

UNIVERSIDADE PAULISTA - UNIP
PROGRAMA DE MESTRADO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

ANÁLISE DAS DETERMINAÇÕES DE VALOR
AMBIENTAL EM EMERGIA DO SISTEMA DE PRODUÇÃO
DE POLIETILENO TEREFTALATO (PET)

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção da Universidade Paulista – UNIP, para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção.

GUSTAVO BUSTAMANTE VARGAS

SÃO PAULO
2017

UNIVERSIDADE PAULISTA - UNIP
PROGRAMA DE MESTRADO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

**ANÁLISE DAS DETERMINAÇÕES DE VALOR
AMBIENTAL EM EMERGIA DO SISTEMA DE PRODUÇÃO
DE POLIETILENO TEREFTALATO (PET)**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção da Universidade Paulista - UNIP.

Orientadora: Prof^ª. Dr^ª. Cecília Maria Villas Bôas de Almeida.

Área de concentração: Sustentabilidade em Sistemas de Produção.

Linha de pesquisa: Avanços em Produção mais Limpa e Ecologia Industrial.

Projeto de pesquisa: Avaliação e Aplicação de Indicadores para Desenvolvimento Sustentável.

GUSTAVO BUSTAMANTE VARGAS

SÃO PAULO
2017

Vargas, Gustavo Adolfo Bustamente.

Análise das determinações de valor ambiental em energia do sistema de produção de polietileno tereftalato (PET) / Gustavo Adolfo Bustamente Vargas. - 2017.

111 f. : il. color. + CD-ROM.

Dissertação de Mestrado Apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Paulista, São Paulo, 2017.

Área de concentração: Sustentabilidade em Sistemas de Produção.

Orientadora: Prof.^a Dra. Cecilia Maria Villas Bôas de Almeida.

GUSTAVO BUSTAMANTE VARGAS

**ANÁLISE DAS DETERMINAÇÕES DE VALOR
AMBIENTAL EM EMERGIA DO SISTEMA DE PRODUÇÃO
DE POLIETILENO TEREFTALATO (PET)**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção da Universidade Paulista – UNIP, para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção.

Aprovado em: ____/____/____

Prof.^{fa}. Dr.^a. Cecilia Maria Villas Bôas de Almeida - UNIP

Prof. Dr. Biagio Fernando Giannetti - UNIP

Prof. Dr. Flávio de Miranda Ribeiro - CETESB

DEDICATÓRIA

À minha família, pelo amor e constante apoio, sobretudo nos momentos turvos da minha vida acadêmica, e pela contribuição para o estabelecimento das bases dos meus princípios.

À minha mãe, por todo esforço e empenho em dar aos filhos orientação aos estudos e à formação acadêmica, que hoje está a dar frutos.

E, em especial, à minha esposa Catalina, pelo seu incondicional amor, por ser a minha companheira de aventuras e pelo sacrifício e compreensão pelas muitas horas de dedicação aos meus estudos.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, a Deus, pela graça e bênçãos que recebo a cada dia e pelo discernimento que guia as minhas decisões.

À CAPES/PROSUP, pelo apoio da bolsa de estudos de mestrado.

À minha orientadora, Prof^a. Dr^a. Cecília Maria Villas Bôas de Almeida, por compartilhar seus conhecimentos e pela sua grande contribuição e constante disposição, essenciais na elaboração e desenvolvimento desta pesquisa.

Aos professores e colegas do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, PPGEPP, que fizeram parte deste caminho, trocando momentos de alegria e enriquecimento pessoal.

Aos professores doutores Biagio F. Giannetti e Feni D. R. Agostinho, pelos momentos dedicados a apoiar, incentivar e ensinar aos seus alunos, com grande vocação e entusiasmo.

Ao professor Dr. Flávio de Miranda Ribeiro, pelo tempo dedicado à revisão deste trabalho e pelas importantes contribuições à pesquisa.

À Prof^a. Dr^a. Sílvia H. Bonilla, pela amizade, pelos conhecimentos passados e pelas boas conversas, que me ajudaram e me incentivaram neste caminho.

A todos os parentes e amigos que, com nobreza, me ajudaram e desejaram o cumprimento das minhas metas.

RESUMO

A produção petroquímica caracteriza-se pela intensidade no uso de recursos não renováveis, tais como o petróleo e seus derivados. Desde uma ótica ecocêntrica, a emergência, medida em joules solares equivalentes (sej), pode ser identificada como estimativa de “valor da biosfera”, baseada no trabalho da natureza para produzir bens e serviços. Nesta avaliação, aplica-se a síntese em emergência e determinam-se valores unitários de emergência (UEV) entre $7,0 \times 10^9$ sej /g, do petróleo, e $1,14 \times 10^{10}$ sej /g, do etileno, produtos intermediários do sistema de produção de polietileno tereftalato (PET). Para isso, usam-se bases de dados de inventários de ciclo de vida (ICV), como fontes de informação sobre a intensidade do uso dos recursos e a tecnologia dos processos, permitindo determinar a contribuição em emergência de cada insumo que participa, direta ou indiretamente, do ciclo de vida dos produtos. O cálculo das UEVs deriva em diferentes interpretações sobre a qualidade do uso da energia e a eficiência dos processos. Em relação aos insumos de mão de obra e serviços, estes, conjuntamente, alcançam porcentagens de contribuição em emergência próximas dos 23% em relação à emergência total dos sistemas de produto. Além disso, considerando-a como medida do valor intrínseco, a emergência é relacionada com os preços de mercado dos produtos analisados, derivando interpretações relativas à distribuição do valor na cadeia de produção e à divergência entre um valor e o outro. Em todos os casos, os valores de equivalentes monetários em emergência ou em dólares, são maiores que os preços de mercado, no entanto, encontram-se dentro da mesma escala de magnitude numérica. As principais contribuições em emergência ao valor provêm das entradas de recursos fósseis para a produção, o que não pode ser igualmente identificado em termos de valores econômicos.

Palavras-chave: Emergência; Contabilidade ambiental; Indústria petroquímica; PET.

ABSTRACT

Petrochemical production is characterized by the intensity in the use of non-renewable resources, such as petroleum and its derivatives. From an ecocentric perspective, emergy, measured in solar equivalent joules (sej), can be identified as an estimate of "biosphere value", based on the work of nature to produce goods and services. In this assessment, the emergy synthesis is applied and the unit emergy values (UEV), between 7.0×10^9 sej /g, from petroleum, and 1.14×10^{10} sej /g, from ethylene, intermediate products of the Polyethylene terephthalate (PET) production system are determined. For this purpose, life cycle inventory databases (LCI) are used as sources of information on the intensity of resource use and process technology, allowing the determination of the emergy contribution of each input that participates, directly or indirectly, in the life cycle of the product. The calculation of the UEVs derives in different interpretations on the quality of the energy usage and the efficiency of the processes. With regard to labor inputs and services, these, together, reach emergy contribution percentages close to 23% in relation to the total emergy of the product systems. Moreover, considering it as a measure of intrinsic value, the emergy is related to the market prices of the analyzed products, deriving interpretations regarding the distribution of the value along the production chain and the divergence between one value and the other. In all cases, the values of the monetary equivalent in emergy, emdollars, are greater than the market prices, but within the same scale of numerical magnitude. The main emergy contributions to value come from inputs of fossil resources to production, which can not be equally identified in terms of economic values.

Keywords: Emergy; Environmental accounting; Petrochemical industry; PET.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Evolução da produção global de plásticos. Preparado a partir da informação reportada em PlasticsEurope (2015).	14
Figura 2 - Cadeia de produção de polietileno tereftalato (PET) grau garrafa (adaptado de PlasticsEurope, 2011)..	30
Figura 3 - Fluxos elementares do sistema de produção ao longo do ciclo de vida dos produtos (figura adaptada de Ulgiati; Brown, 2014)	36
Figura 4- Diagrama de energia para os onze produtos estudados.	37
Figura 5 - Porcentagem de contribuição em energia (sej/sej) por insumo	45
Figura 6 - UEVs das subcadeias de produção 1e 2	48
Figura 7- Energia dos intermediários da cadeia produtiva do PET em função da transformidade.	53
Figura 8- Evolução dos preços e as transformidades na cadeia de produção do PET	57
Figura 9- Regressão linear do preço sobre a transformidade dos produtos do sistema de PET: subcadeias 1e 2.	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Demanda europeia (em massa)* de resinas plásticas por indústrias em 2014	15
Tabela 2 - Contabilidade ambiental em emergia da produção de 1 kg de petróleo	40
Tabela 3 - Contabilidade ambiental em emergia da produção de 1 kg de PET	41
Tabela 4 - Emergia total e UEV por produto	44
Tabela 5- UEVs calculadas com base no petróleo e no gás natural e com base em todos os insumos dos sistemas de produto	47
Tabela 6- UEVs calculadas e comparadas com os valores da literatura	50
Tabela 7- Emergia da mão de obra por indústria para o ano 2008	54
Tabela 8- Contabilidade em emergia com e sem mão de obra	54
Tabela 9- Valores em emergia incluindo a mão de obra e os serviços	55
Tabela 10 - Valores em dólar e preços de mercado	59

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACV	Avaliação de Ciclo de Vida
Sej	Solar equivalent joules
UEV	Unit emergy values
PET	Polietileno tereftalato
PYGAS	Gasolina da pirólise
p-Xileno	Para-xileno
PTA	Purified terephthalic acid
ICV	Inventário de ciclo de vida
EIO	Economic input-output model
EMR	Emergy to money ratio
ISO	International Organization for Standardization
UNEP	United Nations Environmental Program
EPA	Environmental Protection Agency
USA	United States of America
PLA	Poliácido lático
PS	Poliestireno
Emdólar	Equivalente em dólar de emergia
BTX	Benzeno, tolueno e xileno
PIB	Produto interno bruto
NEAD	National Emergy Accounting Database
EPD	Environmental Product Declaration
ELCD	European Reference Life Cycle Database
IEA	International Energy Agency
ILCD	International Reference Life Cycle Data System
MO	Mão de obra

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	12
1.1 Aspectos sobre a complementariedade dos métodos de valoração em energia e econômica	15
1.2 Objetivo geral.....	16
1.2.1 Objetivos específicos.....	16
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1 Conceitos e fundamentos em energia	18
2.2 Avaliação em energia de combustíveis fósseis e produtos petroquímicos	19
2.3 Avaliação de ciclo de vida em processos de produção do PET.....	21
2.4 Energia e ACV	23
2.5 Energia e moeda.....	24
3 MÉTODO	27
3.1 Sistema de produção de PET	27
3.2 Síntese em energia	29
3.3 Fonte e estrutura das bases de dados de ICV.....	33
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	38
4.1 Contabilidade ambiental em energia do sistema de produção de resina PET para garrafas	38
4.1.1 Valores unitários de energia do sistema de produção de PET	44
4.2 Relação entre as UEV estimadas e os valores da literatura	47
4.3 Relação entre transformidades e a qualidade da energia	50
4.4 Contabilidade em energia para a mão de obra e serviços.....	51
4.5 Energia e valor econômico	54
4.5.1 Relação entre emdólares e preços de mercado.....	57
5 CONCLUSÃO	60
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	62

7 REFERÊNCIAS.....	63
ANEXO A- TABELA DE UEVs DE REFERÊNCIA PARA ESTE TRABALHO ...	67
ANEXO B – TABELAS DE CONTABILIDADE EM ENERGIA DO SISTEMA DE PRODUÇÃO DE PET PARA GARRAFAS	70
ANEXO C – MEMORIAL DE CÁLCULO PARA AS TABELAS DE ENERGIA ..	92
ANEXO D – MEMORIAL DE CÁLCULO DA MÃO DE OBRA POR INDÚSTRIA (ANO 2008).....	105
ANEXO E – CÁLCULO DA RAZÃO ENERGIA-DINHEIRO (EMR) PARA EUROPA (ANO 2008).....	107
ANEXO F – PREÇOS USADOS NESTE TRABALHO (NOMINAIS-ANO 2008) .	108

1 INTRODUÇÃO

O plástico, um material intensamente utilizado nas indústrias de transformação, devido a suas propriedades físicas, tem-se tornado um dos principais componentes de todo tipo de produtos de consumo final. Entre as indústrias que amplamente utilizam transformados plásticos como matéria-prima, destacam-se as indústrias de embalagens, automotiva, construção, têxtil, entre outras. A produção de transformados plásticos tem sido uma atividade em constante expansão e crescimento nas últimas décadas (Figura 1).

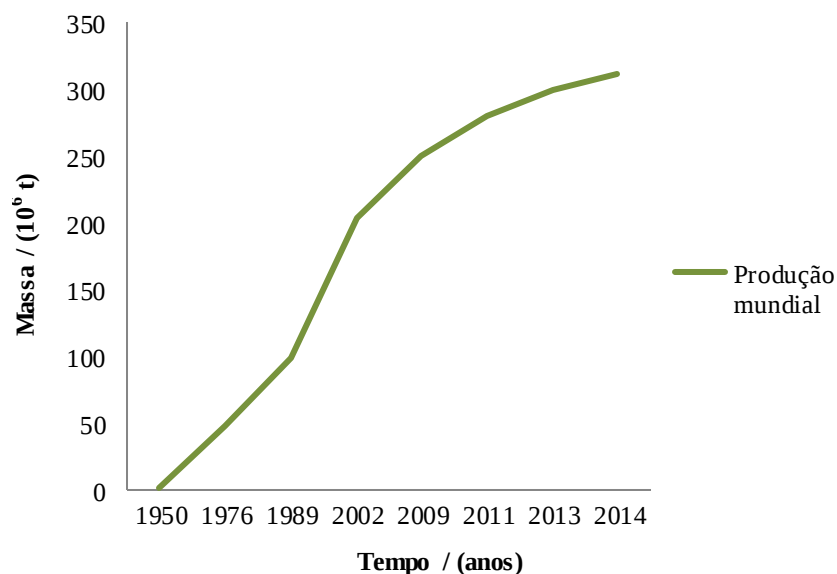


Figura 1 - Evolução da produção global de plásticos. Preparado a partir da informação reportada em PlasticsEurope (2015).

Na etapa inicial da rede de suprimentos dos plásticos, a indústria petroquímica se constitui em uma fonte significativa de produtos intermediários usados como matéria-prima para diversos produtos, entre eles, os transformados plásticos, moldados por extrusão, injeção ou sopro. Nesse grupo de materiais intermediários, encontram-se as resinas plásticas, destinadas, principalmente, à produção de embalagens para alimentos e bebidas, para a qual foram atribuídos os 39,5% das quantidades demandadas de resinas na Europa no ano 2014, em relação a outras indústrias intensivas no uso desse material (PlasticsEurope, 2015) (Tabela 1).

Tabela 1 - Demanda europeia (em massa)* de resinas plásticas por indústrias em 2014

Embalagens	39,5%
Construção	20,1%
Indústria automobilística	8,6%
Equipamentos elétricos e eletrônicos	5,7%
Agricultura	3,4%
Outros	22,7%

Fonte: Preparado a partir da informação contida em PlasticsEurope (2015)

*União Europeia (UE28+Noruega e Suíça).

Existe uma crescente preocupação concernente aos problemas ambientais, não só os relativos à disposição e pós-consumo dos produtos, mas também ao uso eficiente dos recursos nas diferentes etapas de produção. Os sistemas de produção industrial de diversos níveis de complexidade, diferentes tipos de atividades e estruturas organizacionais, caracterizam-se pelo uso intensivo de recursos naturais, os quais suportam a dinâmica produtiva e, por sua vez, geram grandes problemas ambientais. A indústria de transformados plásticos compara-se àquelas indústrias mais próximas do consumidor final, abrangendo a fabricação de produtos e artefatos plásticos a partir de resinas, principalmente derivadas do petróleo e outros recursos de origem fóssil. Os processos de produção intensivos no uso de recursos não renováveis são frequentemente associados com altos custos ambientais, especialmente no que se refere ao risco de esgotamento de recursos estratégicos, tais como o petróleo.

Em décadas recentes, diferentes métodos e ferramentas foram desenvolvidos com o intuito de fornecer informações específicas sobre diversos problemas ambientais, incluindo aqueles ocasionados pela produção baseada no petróleo e outros recursos fósseis. Os métodos de pegada ecológica, avaliação de ciclo de vida (ACV), análise de fluxo de materiais, indicadores de ecoeficiência e sustentabilidade, entre outros, centram-se, principalmente, na medição e avaliação do desempenho ambiental. A síntese em emergia, desenvolvida por H.T Odum (1996), é o único método capaz de refletir o valor dos fluxos biofísicos e monetários que compõem os sistemas em termos de uma medida unificada (joules solares equivalentes, sej). Dessa maneira, a síntese em emergia constitui um método de avaliação e análise dos estoques e fluxos de entrada aos sistemas ambientais e humanos, requeridos para a produção de bens e serviços que suportam a vida na Terra.

A emergia pode ser vista como uma medida das contribuições de trabalho demandadas nos processos de transformação dos sistemas naturais e humanos. Essas contribuições interagem na forma de fluxos de materiais, energia, combustíveis, metais e dinheiro, entre outros. O resultado é uma medida científica da energia disponível, previamente demandada, de maneira direta ou indireta, por cada um desses fluxos. A emergia faz um rastreamento dos recursos empregados até sua origem na biosfera, o lado fornecedor, reconhecendo o esforço ambiental requerido para a produção de um bem ou serviço, no qual recai o valor de um recurso, garantindo a otimização de seu uso (ULGIATI et al., 2011). Dessa maneira, a síntese em emergia inclui a contribuição dos ecossistemas naturais na produção de matérias-primas e em seu uso pelo homem, quantificando todos os investimentos requeridos em unidades físicas comparáveis.

A emergia preenche a necessidade de designar um valor energético e ambiental compatível com a qualidade de diferentes tipos de energia. Um dos princípios conceituais mais importantes da síntese em emergia consiste em que diferentes energias têm diferentes qualidades e, portanto, diferentes custos de produção e distinta habilidade para realizar trabalho. (BROWN et al., 2011).

A produção geológica de recursos fósseis e os sistemas de produção baseados no petróleo têm sido avaliados por meio do uso da síntese em emergia. A importância de quantificar a emergia para recursos primários, como o petróleo, reside no fato de que os valores determinados permitem desenvolver avaliações relativas aos diversos sistemas de produção subsequentes ou dependentes desses recursos. Bastianoni et. al (2005) e Odum (1996) determinaram as valores unitários de emergia (UEV) do petróleo, do carvão e do gás natural. De maneira similar, Brown et al. (2011) estimaram UEVs semelhantes para esses recursos, levando em consideração aspectos adicionais relacionados à sua produção, que aumentaram a abrangência dos seus resultados. Em Bastianoni et al. (2009), os resultados dos estudos anteriores foram estendidos para estimar a emergia dos combustíveis derivados do petróleo. Posteriormente, tais resultados foram usados como parte da análise de diferentes processos de produção de etileno (SHA et al., 2015). Similarmente, Almeida et al. (2010) aplicaram a contabilidade em emergia na produção de embalagens de PET e alumínio no Brasil.

1.1 Aspectos sobre a complementariedade dos métodos de valoração em emergia e econômica

Na economia de mercado, os produtos são valorados e precificados, desconsiderando-se o trabalho dos ecossistemas naturais ao produzirem recursos e fornecerem serviços de suporte para os sistemas humanos. De fato, o paradigma econômico reinante, a economia neoclássica, somente explica uma parte da economia da produção, aquela que é dominada por mercados humanos, independentemente das outras partes, onde os recursos são gerados e reciclados (BROWN et al., 2011). O valor econômico dos recursos tem sua origem na subjetividade humana. A utilidade que um bem ou serviço gera para um indivíduo, acompanhado do seu grau de escassez, representa a principal fonte do valor, o que, no âmbito econômico, determina a demanda global de um produto, estimulando o dinamismo do mercado por meio dos preços.

Os fluxos monetários que circulam em um sistema de produção são destinados à aquisição de bens e serviços (materiais, energia, mão de obra, infraestrutura e assim por diante). Na economia de mercado, aproxima-se, a termos monetários, na forma de preços, o valor baseado na utilidade. Tais preços não são determinados considerando-se o trabalho da natureza ao fornecer os recursos; correspondem, somente, aos pagamentos que são feitos aos humanos por seus serviços na produção, extração, processamento e distribuição de produtos dentro do ambiente de mercado global. Por conseguinte, o dinheiro não se destina à natureza pelos recursos que fornece, e os preços correspondem só ao valor que os diferentes atores do mercado outorgam aos serviços humanos diretos e indiretos e aos processos de produção (ULGIATI; BROWN, 2014).

A comparação entre os preços de mercado e os equivalentes monetários baseados em emergia (em dólares) permite uma análise mais profunda das estimativas de valor próprias de ambas as abordagens. Por sua vez, considera-se uma forma mais receptiva de apresentar resultados para uma sociedade familiarizada com a economia de mercado. A comparação, realizada nesta avaliação, busca interpretar possíveis relações entre esses valores, para um mesmo produto. Desta maneira, as origens diferentes do valor: a biosfera como doador-produtor e o homem como usuário, que outorga valor às coisas conforme a utilidade que elas representam, podem ser consideradas desde a ótica monetária.

Existem poucos trabalhos que abordam a complementariedade entre a síntese em emergia e a análise econômica e, portanto, que identifiquem relações que outorguem uma perspectiva de valor mais integral dos recursos. Ukidwe; Bakshi (2004; 2007) utilizaram

modelos de análises termodinâmicos de sistemas de processos para integrá-los aos modelos econômicos de insumo-produto (EIO), partindo de dados sobre o uso dos recursos em setores específicos da economia e suas UEVs em emergia. Em outros trabalhos, ambas as abordagens foram relacionadas e comparadas em aspectos teóricos, no que se refere a conceitos e princípios próprios desses métodos (CAMPBELL; BROWN, 2012; CAMPBELL; CAI, 2007).

A realização do presente trabalho se justifica na medida em que a atual produção científica ainda carece de resultados que ofereçam informações direcionadas a avaliar a contribuição da natureza como suporte dos sistemas humanos, permitindo obter uma perspectiva mais abrangente sobre o custo do uso dos recursos e melhorando os critérios de decisão, ao considerar aspectos além das estimativas baseadas no mercado. De maneira específica, este estudo pretende complementar as avaliações em emergia sobre sistemas de produção baseados no petróleo que, por sua vez, dão origem a produtos que participam como matérias-primas e componentes de diversas cadeias de produção, com potencial de estudo em futuras pesquisas.

1.2 Objetivo geral

O objetivo desta pesquisa é determinar e analisar os valores em emergia dos produtos intermediários da cadeia de produção de polietileno tereftalato (PET), com base em inventários de ciclo de vida da indústria petroquímica europeia, avaliando o investimento ambiental requerido na obtenção desses produtos. A análise concentra esforços nos aspectos que contribuem com uma visão mais ampla do valor dos recursos na produção petroquímica para a tomada de decisões estratégicas.

1.2.1 Objetivos específicos

- a) Determinar as UEVs de onze produtos intermediários da cadeia de produção do PET.
- b) Identificar e analisar as contribuições em emergia por insumo de todos os sistemas de produto.
- c) Analisar aspectos sobre a aplicação das UEVs dos produtos da cadeia para a tomada de decisões estratégicas.
- d) Estimar a contribuição da mão de obra e dos serviços nos sistemas de produto.

- e) Relacionar e analisar as medidas de valor em energia e valor econômico dos produtos do sistema.

2 REVISÃO BIBLIOGRAFICA

2.1 Conceitos e fundamentos em emergia

No seu livro de 1996, Howard. T. Odum explica todos os aspectos que constituem a síntese em emergia como um método de quantificação e avaliação ambiental. Segundo o autor, a síntese em emergia nasce a partir do esforço de medir a energia incorporada em calorias de um tipo de energia requerida para fazer as de outro tipo. Por conseguinte, considera-se que nem todas as energias são equivalentes na sua contribuição de trabalho útil e, portanto, calorias (ou joules) de diferente tipo não podem ser somadas, a menos que sejam expressas em uma medida comum (joules solares equivalentes, sej). Dessa maneira, Odum afirma que a emergia reconhece e mede a hierarquia universal da energia, na qual intensidades diferentes de um mesmo tipo de energia são requeridas para fazer outros tipos em distintos níveis de hierarquia, por exemplo, uma menor quantidade de joules de energia solar é requerida para fazer um Joule de carvão, em relação ao requerido para um Joule de energia elétrica, o qual se encontra mais à frente na hierarquia da energia que o carvão.

Odum (1996) também explica o procedimento para realizar a contabilidade em emergia para os processos de produção e o aplica em vários casos reais, em contextos diferentes. O autor descreve, detalhadamente, os símbolos relativos aos diagramas de emergia, com os quais se definem os limites da análise e as interações entre os fluxos que contribuem com os sistemas de produção, como ponto de partida da contabilidade em emergia.

A contabilidade em emergia pode ser aplicada em diversas escalas, considerando micro e macrossistemas, os quais incluem fluxos de diversas complexidades e áreas de influência. Assim, por meio da contabilidade em emergia, é possível quantificar a emergia das nações em um período de tempo específico (geralmente um ano) e uma região determinada (geralmente um país). A partir dos anos oitenta, vários estudos se focaram na contabilidade a macro-escala de países (ODUM; ODUM, 1983; PILET; ODUM, 1984; ODUM et al., 1987; BROWN; McCLANAHAN, 1992; ULGIATI et al., 1994; ODUM, 1996, entre outros). Essas estimativas conduzem à determinação da razão emergia-dinheiro (*Emergy to money ratio* - EMR) das economias analisadas, a qual representa o poder de compra do dinheiro e que, por sua vez, depende da produção de emergia solar e da circulação do dinheiro na economia (ODUM, 1996). Dessa maneira, a emergia também poderia considerar e converter a sej fluxos em dinheiro ao sistema, usando a EMR, como um fator médio de conversão de emergia por unidade de moeda.

2.2 Avaliação em emergia de combustíveis fósseis e produtos petroquímicos

Existem poucos casos em que a emergia foi empregada para avaliar sistemas de produção baseados no petróleo ou seus derivados. Odum (1996) determinou valores em emergia do petróleo e combustíveis derivados. Para isso, o autor partiu da estimativa da transformidade¹ do carvão em $6,72 \times 10^4$ sej/J, que corresponde à média das transformidades dos seus processos de formação geológica e da geração de eletricidade. Esse valor foi multiplicado pela relação de 1,65 J de carvão por J de combustível de motor (SLESSER, 1978), resultando em $1,1 \times 10^5$ sej/J para combustíveis derivados do petróleo. A partir desse valor, Odum estima a transformidade do petróleo ($9,0 \times 10^4$ sej/J) conforme a relação de rendimento de 1,23 entre petróleo cru e os seus derivados, segundo Cook (1976).

Bastianoni et al. (2005) determinaram as UEVs do petróleo e do gás natural, segundo o seu processo de produção geológica, em $3,96 \times 10^9$ sej/g e $3,50 \times 10^9$ sej/g, respectivamente, e propuseram o uso de UEVs médias entre estas e as determinadas por Odum (1996). Cabe destacar que as informações utilizadas por esses autores correspondem a dados relativos aos processos de formação desses recursos e a informações disponíveis para um local específico na Rússia, local conhecido como o mais produtivo quanto à formação do petróleo (BROWN et al, 2011). Por conseguinte, as UEVs estimadas por Bastianoni et al. provavelmente se encontrem próximas das UEVs de formação mínimas, uma vez que se consideram condições ideais para a formação desses recursos.

Posteriormente, Bastianoni et al. (2009) complementaram os resultados anteriores por meio da estimativa de uma transformidade geral para derivados líquidos do petróleo em $1,12 \times 10^5$ sej/J, a partir da transformidade média de dois sistemas de refinaria estudados: Falconara, na Itália, e a indústria do refino dos Estados Unidos, para o período 1993-2004. Esse último valor se encontra 1,67 % acima da transformidade obtida por Odum (1996) ($1,1 \times 10^5$ sej/J). Tais autores estabelecem a hipótese de que os produtos derivados do refinamento do petróleo podem se considerar como “splits”, uma vez que são frações-produto de uma mistura complexa de hidrocarbonetos com diferentes densidades². Além disso, nos seus resultados de pesquisa, contabiliza-se a estrutura de custos de duas refinarias, onde se incluem

¹ A transformidade é a relação de conversão de uma energia de um tipo e outra de outro tipo. Por tanto, no método em emergia, usa-se o termo transformidade para se referir à transformidade solar a qual é a relação entre a quantidade de emergia (joules solares equivalentes, sej) sobre 1 Joule (J) resultante de outro tipo de energia. A transformidade é a UEV em relação à unidade de energia, Joule.

² Este e outros aspectos relacionados são descritos com maior detalhe nos resultados do presente trabalho.

os fluxos de entrada de serviços ligados ao petróleo (extração e transporte), manutenção, equipamento e mão de obra.

Em um estudo mais recente, Brown et al. (2011) estimaram intervalos das transformidades do carvão em $6,63 \times 10^4 (\pm 0,51 \times 10^4)$ sej/J e $9,71 \times 10^4 (\pm 0,79 \times 10^4)$ sej/J para carvão betuminoso e hulha, respectivamente, e, do petróleo e gás natural, em $1,48 \times 10^5 (\pm 0,07 \times 10^5)$ sej/J e $1,70 \times 10^5 (\pm 0,06 \times 10^5)$ sej/J, respectivamente. Para atingir esses resultados, os autores basearam sua análise nos processos geológicos de formação, levando em conta aspectos diferentes aos considerados por Odum (1996) e Bastianoni et al. (2005). Essas diferenças residem em que as transformidades determinadas neste estudo não são relativas a casos específicos, seguindo uma mensuração mais abrangente, uma vez que foram consideradas todas as reservas convencionais conhecidas de petróleo, gás natural e carvão, para cada era geológica. Além disso, foram separados os processos de produção em processos biológicos e processos geotérmicos, com relação à sequência de formação desses recursos. Os autores destacam que os “tratamentos” geotérmicos não foram considerados por Bastianoni et al. (2005), os quais são necessários para converter a massa orgânica em querogênio e, finalmente, em petróleo e gás no processo de catagênese. Ao invés disso, evitaram-se as incertezas relativas ao tempo e o calor requerido para a formação de petróleo, baseando tal estimativa na emergência do conteúdo de carbono no querogênio, conteúdo esse necessário para produzir determinada quantidade de petróleo (BASTIANONI et al. 2005).

Em relação aos processos subsequentes da etapa de refinamento do petróleo, Sha et al. (2015) analisam quatro sistemas de produção de Etileno, a partir de matérias-primas diferentes e, por meio de diversos índices em energia, avaliam o desempenho dos sistemas. Dois desses sistemas se baseiam em matérias-primas de origem fóssil, especificamente, a nafta e o gás natural, os outros dois estão baseados em biocombustíveis a partir da biomassa. Esses autores utilizaram uma UEV da nafta ($5,02 \times 10^9$ sej/g), estimada ao multiplicar o poder calorífico ($4,45 \times 10^4$ J/g nafta) e a transformidade dos derivados líquidos do petróleo de Bastianoni et al. (2009). Com relação ao gás natural, utilizou-se a mesma transformidade determinada por Bastianoni et al. (2005). No processo a partir da nafta, foi estimada a UEV do etileno em $8,16 \times 10^9$ sej/g, baseada na análise dos fluxos ao processo convencional de craqueamento a vapor e incluindo todos os coprodutos do sistema.

Por último, Almeida et al. (2010) aplicaram a síntese em energia, com base nos dados de um estudo prévio de ACV das cadeias de produção de embalagens de PET e alumínio para bebidas no Brasil, incluindo as etapas de reciclagem. O objetivo deste estudo se centrou na contribuição da análise na seleção dos materiais e processos durante a concepção do produto.

Os dados de inventário de ciclo de vida utilizados partem das informações comunicadas por um grupo de empresas brasileiras. Essas informações foram coletadas por meio de questionários e incluem dados sobre o uso de matérias-primas, energia, materiais semimanufaturados e auxiliares e de combustíveis para os transportes, considerando-se somente a produção brasileira.

Neste trabalho, a produção de resina de PET como pré-forma para embalagens de bebidas é também analisada. No entanto, uma análise mais abrangente é desenvolvida sobre as energias específicas de onze produtos intermediários que compõem essa cadeia de produção, considerando sistemas de produto separadamente, com base em um inventário de ciclo de vida (ICV) diferente para cada produto. A estrutura de dados utilizada neste estudo tem um maior nível de detalhe, desde que são consideradas as quantidades cumulativas dos fluxos elementares de todo o ciclo de vida de cada produto.

2.3 Avaliação de ciclo de vida em processos de produção do PET

A ACV, método atualmente estandardizado pela *International Organization for Standardization* (ISO)14040-44 (ISO, 2006) e amplamente aceito por parte da comunidade científica e industrial, tem resultado em uma grande variedade de estudos e relatórios para diferentes casos de produtos e processos, alguns deles apoiados por importantes entidades e organizações [United Nations Environmental Program (UNEP), Environmental Protection Agency (EPA), Comissão Europeia, entre outras]. Muitos desses estudos são facilmente acessíveis e uma parte deles utiliza bases de dados de livre acesso ou de tipo comercial, que contam com uma ampla quantidade de processos, como o caso da Ecoinvent.³ A ACV produz resultados tanto quantitativos quanto qualitativos, com base na análise de diferentes categorias de impacto, suportada nas informações de ICV sobre entradas e saídas dos sistemas. Em alguns casos, esse método foi aplicado para avaliar o sistema de produção de resina de PET ou outro tipo de sistemas que o incluem como uma de suas etapas dentro do ciclo de vida dos produtos.

Por um lado, Person et al. (1998) realizaram uma ACV extensa, que originou uma série de relatórios técnicos para diferentes sistemas de embalagem, entre eles as garrafas de PET, dando como resultado a estimativa de impactos ambientais potenciais dos sistemas. Por outro lado, Shen et al. (2010) aplicou a ACV à produção de fibras de PET a partir de material

³ <http://www.ecoinvent.org/>

reciclado, incluindo, em seu estudo, quatro diferentes sistemas de reciclagem de produto, entre os quais se encontram a reciclagem por via química e a reciclagem mecânica. Entre as etapas da análise, compara-se cada um dos sistemas com a produção de fibra de PET a partir da resina virgem e se interpretam as diferenças relativas segundo o impacto ambiental gerado.

Madival et al. (2009) avaliaram o impacto meio ambiental do ciclo de vida de recipientes plásticos para embalagens de alimentos na Califórnia (USA), compostos de três resinas diferentes: políácido láctico (PLA), polietileno tereftalato (PET) e poliestireno (PS). O primeiro deles provém de fontes renováveis; os outros dois, de matéria-prima fóssil. Segundo os resultados obtidos, a produção de embalagens a partir do PET corresponde ao maior impacto na maioria das categorias analisadas, em comparação com as outras resinas. Nos resultados de análise por etapas do ciclo de vida do produto, existe uma forte ligação ao caso específico considerado pelos autores, uma vez que o maior impacto foi atribuído à etapa do transporte, para o qual foram avaliadas distâncias entre processos e tipos de transporte específicos.

Vários estudos baseados na ACV de produtos que utilizam embalagens plásticas como componente importante do produto final incluem uma análise separada da fase de produção da embalagem, considerando os processos a montante necessários sobre os materiais que os constituem. Amienyo et al. (2013), em um trabalho sobre ACV de bebidas gaseificadas (refrigerantes) no Reino Unido, focalizaram seus resultados na etapa do ciclo de vida com maior impacto ambiental: a produção de embalagem. Esses autores realizaram uma análise comparativa de quatro tipos de embalagens diferentes: a garrafa de PET (0,5L e 2L), a garrafa de vidro (0,75L) e a lata de alumínio (0,33L). Eles autores concluíram que, dos três tipos de embalagem, as garrafas vidro constituem o produto com maior impacto, no que se refere às categorias ambientais consideradas neste trabalho. No entanto, é necessário enfatizar que as vantagens de um material sobre outro mudam conforme as taxas de reciclagem e o reuso das embalagens, ou seja, como é destacado pelos autores, “se a reciclagem das garrafas de PET aumentasse em 60%, as garrafas de vidro precisariam ser reusadas 20 vezes para fazer a sua pegada de carbono comparável”.

2.4 Energia e ACV

Na literatura, há, também, alguns trabalhos que tratam aspectos da integração entre a análise em energia e a ACV de produtos e processos. Bakshi (2002) aborda a questão da coerência nos limites de análise ao integrar ambos os métodos. O autor propõe como estudo

de caso a fase de crescimento do grão de soja e utiliza informações sobre as entradas ao sistema, reportadas no ICV, na forma de insumos de materiais e energia, para determinar a emergência do processo. Além disso, adicionam-se entradas como água, sol, chuva, erosão do solo e mão de obra, como forma de representar, embora sob risco de sobressimplificação, aqueles bens e serviços dos ecossistemas que não foram levados em conta no ICV, além de serviços de mitigação e absorção das emissões. O resultado da análise é um valor em emergência mais abrangente do que aquele obtido por meios tradicionais, que estima valores para os recursos econômicos e ecológicos demandados pelo processo e, também, para os impactos das suas emissões.

Raugei et al. (2007) propõem uma abordagem alternativa, servindo-se de um dos softwares de ACV comercialmente disponíveis para o cálculo da emergência como uma das suas categorias de impacto, por meio da aplicação de UEVs aos resultados de inventários de ciclo de vida. Esses inventários correspondem a uma lista de insumos e produtos do sistema, desde uma escala local para uma de ciclo de vida, incluindo, dessa maneira, os requerimentos de material e energia indiretos e as emissões, relacionados aos insumos diretos do sistema. Os autores enfatizam que o uso de ferramentas informáticas facilita o trabalho operativo, quando se considera uma análise que envolve grande quantidade de processos e produtos.

Embora a utilização de ICVs não constitua uma forma convencional de obter resultados em emergência, Rugani; Benetto (2012) destacam a precisão e consistência de tais resultados utilizando esse tipo de informação. Os autores chamam a atenção sobre uma das maiores limitações metodológica da emergência: o cálculo das UEV, especialmente, no uso de modelos de sistemas econômicos muito simplificados em termos de estrutura. Consequentemente, o uso de modelos de sistemas em rede, detalhados, como nos ICV, poderia melhorar a precisão das estimativas em emergência, já que incluem uma série de processos tecnológicos e seguem estritas normas de qualidade, além de serem periódica e sistematicamente atualizados. Entretanto, os referidos autores também realçam o imprescindível ajuste das diferenças entre ambos os métodos ao se utilizarem ICVs dentro do esquema da emergência. Essas diferenças recaem principalmente nos procedimentos de alocação em processos multiprodutos e nos limites do sistema.

Ingwersen (2011) propõe a emergência como indicador do uso de recursos dentro de um esquema de ACV baseado em processos. Dessa maneira, foram avaliados os processos unitários para um caso específico de produção mineira no Peru. O autor amplia os limites de análise do sistema ao adicionar processos de tipo *background* como formação geológica, exploração e infraestrutura mineira. O estudo suporta-se em dados de tipo primário e

secundário registrados nos ICV, obtidos em grande parte de bases de dados comerciais, como Ecoinvent e GABI. Ingwersen propõe duas abordagens de alocação para o cálculo da emergência, considerando os produtos do processo de extração e refinamento (ouro, prata e mercúrio) como coprodutos: a primeira, a abordagem convencional da álgebra em emergência, na qual se atribuem os 100% da emergência a cada coproduto; a segunda, aplicada frequentemente na ACV, relaciona-se à alocação econômica, a qual reflete as motivações dos produtores. Consequentemente, essas duas alternativas fornecem resultados diferentes.

2.5 Emergência e moeda

Ulgianti et al. (2011) apresentam uma discussão sobre o valor dos bens e serviços para a humanidade. No seu artigo, mencionam a necessidade de incluir o trabalho realizado pela biosfera na geração de bens e serviços e, dessa maneira, determinar uma medida de valor mais adequada e integral. Para isso, eles destacam a contabilidade em emergência como uma ferramenta útil na identificação de um “valor da biosfera” para recursos e commodities, a qual poderia se complementar com as determinações de valores monetários. Tal ideia é esclarecida pelos autores com base em argumentos de resposta às críticas feitas em relação à emergência, as quais a identificam, erroneamente, como um método de valor proposto para substituir os de valor econômica, deixando de lado a racionalidade dos seres humanos em suas escolhas. Portanto, os autores discutem esse argumento focando-se no objetivo central da síntese em emergência de fornecer um valor “ecocêntrico” dos processos e produtos dos sistemas, em contrapartida ao valor antropocêntrico da economia, baseado, principalmente, nas preferências humanas e na dinâmica do mercado.

Campbell; Cai (2007) trataram extensivamente o tema do valor, referindo-se à síntese em emergência e à teoria econômica do valor como métodos de determinação do valor do produtor (lado doador) e do consumidor (lado usuário), respectivamente. Os autores realizaram uma análise comparativa, partindo da adaptação de princípios e axiomas econômicos da teoria marginalista do valor à linguagem de sistemas de emergência, com o intuito de identificar e interpretar, hipoteticamente, as relações entre os valores econômicos e os derivados da análise em emergência. O estudo centra-se nos mecanismos para a tomada de decisões dos indivíduos ao maximizarem sua utilidade⁴, a qual, segundo a adaptação feita

⁴ Na teoria econômica, o consumidor é entendido como um ser racional que toma decisões de consumo, tentando maximizar a sua satisfação pessoal (utilidade), obtida pelo consumo de bens e serviços. O princípio da

pelos autores, se estabelece como uma analogia do princípio de máximo empower na teoria da emergia. As relações entre os preços de mercado e os valores em emergia foram observadas e determinadas em um estudo de caso de produtos de diferentes setores da economia, mas constituídos a partir de recursos da floresta nos Estados Unidos.

Trabalhos como Campbell; Tilley (2004) têm sido feitos com o intuito de determinar o valor em emergia dos bens e serviços oferecidos pela natureza. Eles realizaram uma pesquisa que estima um valor monetário em dólares para o trabalho ecológico (serviços e capital dos ecossistemas), baseado completamente em fluxos ambientais em emergia. Os autores denominaram esses valores como “eco-prices”, que relacionam os serviços derivados do meio ambiente (no seu estado natural) com a moeda. O “eco-price” define-se como o fluxo de emergia de um serviço do ecossistema relativo ao valor em dinheiro estimado, que flui em contracorrente. Similarmente, Campbell; Brown (2012) complementaram a análise anterior de 2007, realizando, para o Sistema Nacional de Florestas dos Estados Unidos, uma estimativa de valores econômicos dos serviços dos ecossistemas e do capital natural, com base no seu suporte em emergia, ou seja, nos equivalentes monetários da emergia (em dólares, Em\$). No caso de estudo, os valores em emergia calculados foram convertidos a dólares quando multiplicados pela EMR determinada para os Estados Unidos para o ano de 2005. Além disso, os emdólares estimados foram comparados com os valores econômicos calculados para todas as categorias de serviços dos ecossistemas, com base em preços de mercado, custos de uso, manutenção e conservação, e obtidos da literatura, considerando-se diferentes abordagens para a sua valoração.

Partindo-se de uma perspectiva de valor intrínseco baseado no que foi requerido para produzir um fluxo ou estoque e oferecer serviços que suportam os ecossistemas terrestres, a emergia representa uma medida da contribuição líquida das transações. Odum (2000) ressalta: “para determinar se algo oferece uma contribuição líquida para a economia, tudo pode ser relacionado em unidades de emergia solar”. Citando alguns exemplos, o autor reforça a anterior ideia: “combustíveis fósseis, dependendo da sua concentração e preço, oferecem de 3 a 15 vezes mais emergia do que a economia usa para extraí-los e processá-los. O petróleo do xisto e a eletricidade fotovoltaica não têm uma contribuição líquida em emergia”. Portanto, os valores em emergia revelam a iniquidade que existe no comércio internacional, especialmente, no comércio de recursos primários, como as matérias-primas, entre países em

níveis diferentes de desenvolvimento, onde, geralmente, esses recursos carregam com mais emergência do que aquela que suporta a quantidade de dinheiro usada como pagamento.

Tomando como referência os anteriores casos, é possível destacar a síntese em emergência como uma ferramenta promissora para a gestão de políticas públicas e a tomada de decisão que minimiza a necessidade de suportar as decisões estratégicas de gestão sobre uma base quantitativa sólida. Similarmente, as agências do governo, cujas funções visam proteger e preservar o meio ambiente, bem como o uso racional dos recursos, requerem métodos consistentes que permitam explicar e relacionar os valores biofísicos e econômicos dentro do mesmo marco avaliativo. Nessa sequência, os resultados em emergência fornecem informações adicionais sob um ponto de vista diferente, mas relevantes para a gestão do capital natural e a riqueza das nações, permitindo a integração das preferências humanas de âmbito local com o suporte da biosfera em uma escala maior.

3 MÉTODO

A síntese ambiental em emergia é o método escolhido para cumprir os objetivos propostos nesta avaliação. O sistema de produção de resina de PET para embalagens tipo garrafa foi selecionado como caso de aplicação do método em um contexto real de produção. O desenvolvimento do método para o estudo de caso está suportado em informações detalhadas, apresentadas na forma de inventários de ciclo de vida para cada um dos produtos analisados.

3.1 Sistema de produção de PET

Para efeitos da análise, neste trabalho, são considerados onze produtos intermediários pertencentes ao sistema de produção de resina de PET para embalagens tipo garrafa, os quais constituem onze sistemas individuais de produto, como se explica na seção sobre a fonte e estrutura dos dados.

A Figura 2 é uma representação da cadeia de produção da resina de PET, composta por processos que se iniciam na extração e no processamento do petróleo e culminam na produção da resina no seu estado sólido, a qual é adequada para embalagens tipo garrafa, via injeção ou sopro. O petróleo e o gás natural constituem a principal matéria-prima de todos os produtos da indústria petroquímica, uma vez que correspondem a uma mistura de hidrocarbonetos. Por meio de diferentes processos físico-químicos, tal mistura é separada em compostos de cadeias carbônicas menores, que, por sua vez, são matérias-primas de outros produtos em processos produtivos posteriores.

A nafta representa a principal fração ou derivativo do petróleo utilizado na indústria petroquímica. É obtida na fase de refinamento, especificamente, na etapa de destilação fraccionada, onde o petróleo cru flui por meio de uma coluna que possui diferentes gradientes de temperatura de acordo com os pontos de ebulição dos hidrocarbonetos, os quais, uma vez condensados, são separados em vários produtos funcionalmente diferentes, sendo a nafta um deles. As etapas subsequentes do sistema, como o craqueamento a vapor, produção de etileno glicol, produção de ácido tereftálico e polimerização, entre outras, integram uma grande variedade de processos unitários e produtos ao longo da cadeia, cada um com uma importante contribuição ao balanço total de recursos. No final da cadeia de produção, a resina termoplástica de PET no seu estado sólido (grau garrafa) é obtida e usada como matéria-prima

para a produção de embalagens tipo garrafa para bebidas, cosméticos e outros tipos de produtos.

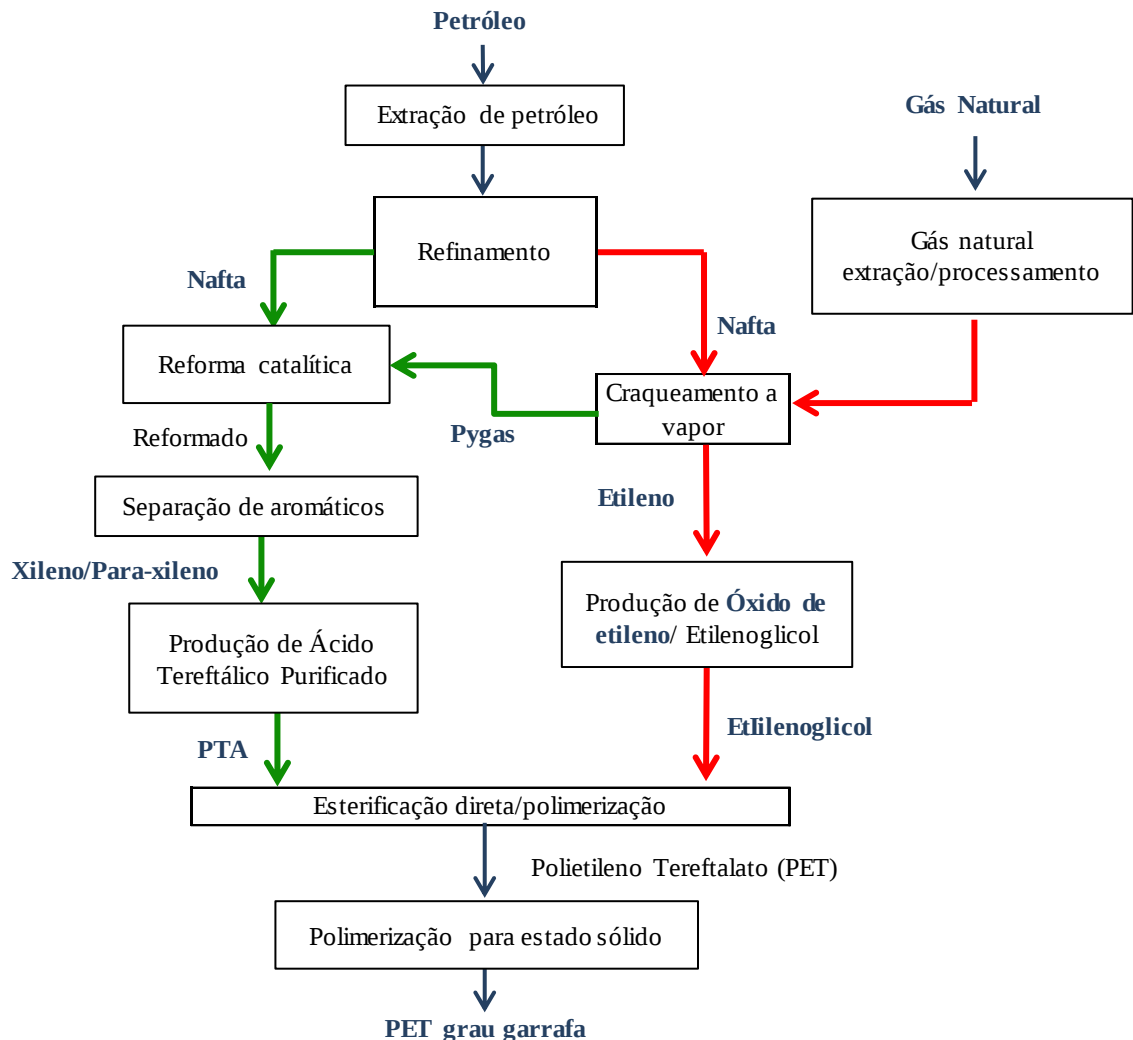


Figura 2 - Cadeia de produção de polietileno tereftalato (PET) grau garrafa (adaptado de PlasticsEurope, 2011). Em azul, destacam-se os 11 intermediários estudados. Em verde e vermelho, a subcadeia 1 e 2, respectivamente.

A cadeia de produção do PET encontra-se dividida em duas subcadeias (1 e 2). A subcadeia 1 inclui os processos de obtenção do xileno baseado na nafta e/ou na gasolina da pirólise (PYGAS)⁵ e o processo de separação do para-xileno, seguido da produção do ácido tereftálico purificado (PTA). A subcadeia 2 é composta por processos ligados ao etileno, como o craqueamento a vapor, produção de óxido de etileno e produção de etileno glicol.

⁵ O xileno pode ser indistintamente derivado da nafta ou do pygas, mas, geralmente, são usados ambos os componentes. Isso se deve a aspectos de mercado, tais como os preços e a disponibilidade desses recursos.

Dessa forma, um composto ácido (PTA) e um álcool (etileno glicol) reagem para a obtenção de um monômero que posteriormente é polimerizado para produzir a resina PET.

A estrutura de cadeia de produção anterior não define a estrutura desta análise em emergia baseada nos inventários de ciclo de vida de cada produto, isto é, nesta avaliação, qualquer um dos sistemas de produto representa um sistema de análise separado e independente dos outros sistemas. O objetivo da Figura 2 centra-se em mostrar como os onze produtos se encontram interligados, e não em definir uma estrutura de análise.

3.2. Síntese em emergia

Odum (1988, 1996) define emergia como a quantidade de energia disponível de um tipo previamente requerida, direta ou indiretamente, para obter um bem ou serviço, ou, um fluxo de energia de outro tipo em um determinado processo. A emergia é medida em joules solares equivalentes (sej), uma vez que o sol é a fonte comum de todos os fluxos de energia circulantes na biosfera. Assim, quanto maior for a emergia requerida por um processo de produção, maior será a quantidade de energia solar previamente contida, transformada e consumida (ODUM, 1996). Emergia é, portanto, uma medida de todas as contribuições recebidas por qualquer sistema. Essas contribuições correspondem aos estoques e fluxos de entrada como energias de um tipo que constituem trabalho, na forma de transformação da energia, ou seja, as diferentes entradas ao sistema interagem para transformar energias de um tipo em outras de outro tipo.

Dado que a emergia é medida em sej, as UEVs são coeficientes de intensidade, que podem ser usados para converter todos os fluxos de entrada aos sistemas em emergia. As UEVs são utilizadas quando os fluxos considerados não são, diretamente, de origem solar e se expressam em sej/unidade (gramas, joules, litros, moeda, dentre outros). Usa-se o termo transformidade quando as UEVs se expressam como a razão de emergia requerida pelo fluxo de energia do produto, sej/J. Quando relacionadas à capacidade de realizar trabalho e utilizadas como indicadoras da hierarquia da energia, as UEVs podem ser consideradas como medidas da qualidade da energia (ODUM, 1996). Quando associada à quantidade de produto obtido a partir da intensidade dos insumos (requerimentos em emergia), a UEV distingue-se como medida de eficiência dos processos.

Como descrito por Ingwersen (2011), existem três aspectos importantes que justificam, sob o ponto de vista teórico, o uso da emergia em qualquer contexto de análise:

- A emergia oferece uma medida mais consistente de requerimentos de energia, uma vez que rastreia as entradas de energia mais além do ciclo de vida (como ele é conhecido) do que qualquer outro método termodinâmico.
- A emergia estima o trabalho do meio ambiente para restituir o que é usado nos processos de transformação, que corresponde ao trabalho equivalente ao requerido para sua produção inicial.
- A emergia é estimada em uma medida unificada do uso dos recursos, em joules solares equivalentes (sej), sem a necessidade de esquemas ponderados para comparar e interpretar resultados.

Tal como foi estabelecido por Odum (1996), o método de contabilidade ambiental em emergia é aplicado, neste estudo, para avaliar e quantificar todos os fluxos de entrada (insumos) envolvidos nos processos de transformação do sistema de produção em consideração e para determinar as UEVs (sej/g) dos produtos desse sistema, como expressado pela equação 1.

$$EM = \sum Em_i = \sum f_i \times UEV_i \quad i= 1, \dots, n \quad (1)$$

Onde, EM é a emergia total do sistema ou subsistema; Em_i , a emergia do insumo de ordem i ; f_i , a quantidade do insumo de ordem i ; e UEV_i , o coeficiente de intensidade em emergia do insumo de ordem i .

A equação anterior constitui a base para a consolidação das tabelas em emergia, as quais são construídas a partir da informação específica sobre os fluxos de entrada do sistema analisado e das especificações necessárias para o cálculo da emergia. Para esse propósito, as informações são categorizadas pelas colunas da tabela e estas são usualmente construídas no mesmo formato (BROWN; ULGIATI, 2004). A quantidade de cada insumo é multiplicada pela sua respectiva UEV (tomada da literatura), e o resultado é a emergia por insumo. Somadas, as emergias por insumo determinam a emergia total do processo e, portanto, do produto. A contribuição de cada insumo sobre o total da emergia é também avaliada em termos percentuais, o que permite determinar a dependência do sistema sobre alguns recursos específicos.

As UEV usadas neste trabalho são coletadas da literatura disponível, de acordo com as características próprias de cada fluxo, e associadas à linha base $15,83 \times 10^{24}$ sej/ano, a qual corresponde ao cálculo aproximado de reabastecimento anual dos recursos renováveis, a partir de fluxos de radiação solar, energia geotérmica e gravitacional ao planeta (ODUM, 2000). Todas as UEV usadas nesta avaliação e as suas respectivas referências estão relacionadas no Anexo A.

As tabelas de emergia facilitam a contabilidade das contribuições em emergia de cada fluxo elementar requerido para produzir 1 kg de produto e, portanto, a emergia total demandada. As tabelas são compostas com a ajuda de UEVs calculadas em trabalhos anteriores, disponíveis na literatura ou nas bases de dados sobre emergia. Para este estudo de caso, foram consideradas as UEVs, por insumo, mais adequadas à estrutura do sistema e da informação, mantendo-se uma consistência relativa entre os diferentes tipos de análise, principalmente, no caso de insumos, como o petróleo e o gás natural, uma vez que sua importância nos resultados merece uma atenção especial. Para esses insumos que, em todos os casos, contribuem com mais de 92% do total da emergia, procurou-se uma UEV coerente com o seu caráter de fluxo elementar no ICV. Nesses casos, foram levadas em consideração as UEVs de formação geológica estimadas por Brown et al. (2011) em $1,56 \times 10^5$ sej/J e $1,78 \times 10^5$ sej/J, para o petróleo e o gás natural, respectivamente. Essas UEVs foram selecionadas, ao invés das UEVs de formação de Bastianoni et al. (2005), uma vez que os dados usados na sua determinação correspondem a uma região na Rússia, considerada como a melhor quanto às condições para a produção de petróleo e, conseqüentemente, com os mais altos níveis de eficiência associados a transformidades mínimas. Brown et al. (2011), por sua parte, consideram todas as reservas globais conhecidas e o processo geotérmico necessário para a formação dos recursos.

Para vários outros minerais, foi usada a UEV de $1,00 \times 10^9$ sej/g, determinada por Odum (1996) (multiplicada pelo fator 1,68 para concordância com a linha base usada nesta avaliação), que corresponde à estimativa do fluxo de emergia do ciclo sedimentar da terra e que Odum atribui a elementos da crosta terrestre, por serem considerados de processos paralelos derivados do ciclo. Para outra importante porção de metais e minerais, foram usadas as UEVs estimadas por Cohen et al. (2007), como pode ser observado no Anexo A.

Os fluxos relacionados à etapa de construção das plantas, infraestrutura e manutenção, não foram considerados neste trabalho, uma vez que a sua influência na emergia total requerida, em conformidade com a produção petroquímica, é pouco significativa, ou seja, em torno de 4% (BASTIANONI et al. 2009; SHA et al., 2015). Da mesma forma, a avaliação em

emergia se realiza, em primeira instância, desconsiderando-se o insumo de mão de obra específica por tipo de trabalhador e os serviços relativos ao trabalho indireto, com o intuito de avaliar somente a eficiência tecnológica relativa dos sistemas de produtos. Esses fluxos dependem, em grande medida, da estrutura social e econômica local e, conseqüentemente, limitam a avaliação a uma determinada região, restringindo o escopo global da análise. No entanto, para considerações próprias da região europeia, acrescenta-se o cálculo dos serviços humanos que provêm da produção indireta aos sistemas, seguindo o procedimento detalhado por Ulgiati; Brown (2014). Além disso, nesta análise, a mão de obra é contabilizada somente como entrada de energia metabólica aos processos de produção, evitando-se, assim, aspectos da experiência, competências, formação e todos os fatores externos que suportam o trabalho humano.

Ulgiati; Brown (2014) propuseram uma forma de contabilizar a emergia dos serviços humanos, aqueles entendidos como entradas de trabalho direto e indireto (mão de obra e serviços, respetivamente), necessários no ciclo de vida da produção dos insumos ao sistema. No entanto, comumente, os serviços são contabilizados de maneira separada da mão de obra direta. Portanto, o cálculo dos serviços inclui somente o trabalho indireto por meio dos insumos ao sistema. Segundo os autores, devido à multiplicidade de etapas e processos de tipo *background* nos quais o trabalho foi aplicado, dificulta-se a sua contabilidade por horas ou anos e, portanto, esse processo se realiza com base nos pagamentos de dinheiro como reflexo dos preços de mercado. Dessa maneira, no procedimento de cálculo proposto, a medida de emergia dos serviços resulta da multiplicação dos preços nominais dos insumos para o ano 2008 pela EMR da Europa para o mesmo ano.

A EMR (sej/moeda) é o valor médio em emergia de uma unidade de dinheiro para um país ou uma região e corresponde, relativamente, à emergia total requerida para gerar o Produto Interno Bruto (PIB) (ODUM, 1996), como medida em moeda da produção local em um período de tempo determinado. Dessa maneira, para motivos desta avaliação, a EMR foi estimada considerando os 30 países europeus com o maior volume de produção, em massa, de refinaria e petroquímica⁶. Por conseguinte, foram somadas as emergias desses países (National Energy Accounting Database – NEAD) e divididas pelo PIB nominal do ano 2008 (Banco Mundial) (Anexo E).

Considera-se a EMR como um coeficiente de conversão que facilita a comparação entre as valorações em emergia e econômicas. Por um lado, é usada para converter os

⁶ Segundo informações obtidas do Banco Mundial - <http://data.worldbank.org>, e, Petrochemicals Europe - www.petrochemistry.eu

pagamentos correspondentes aos serviços humanos em emergia; por outro lado, reflete, em moeda equivalente, a emergia dos bens e serviços. Levando-se em conta que o dinheiro somente paga pelos serviços humanos incorporados nos produtos, a EMR poderia ser considerada como o valor médio em emergia dos serviços em um país (CAMPBELL; CAI, 2007).

O valor em moeda equivalente com base na emergia, ou Emdólar, facilita a comparação com os valores econômicos dos produtos do sistema, determinados diretamente dos preços em dólares correntes para o ano 2008. O valor Emdólar não muda a perspectiva de valor do lado doador, somente é uma representação em dólares equivalentes do investimento da biosfera em cada produto.

3.3 Fonte e estrutura das bases de dados de ICV

Toda a informação sobre a intensidade dos insumos foi tomada de documentos ecoperfis que são parte do Programa de Ecoperfis e Declarações Meio Ambientais de Produto (EPD) da Associação Europeia de Produtores de Plásticos, PlasticsEurope. Esses documentos são ICVs, cujos limites de análise estão definidos pelo ciclo de vida dos produtos desde o “berço até o portão”, ou seja, desde a extração de matérias-primas e recursos primários até o produto, pronto para ser transportado ou transferido ao próximo consumidor. Os inventários estão compostos, principalmente, de fluxos em energia e massa, os quais ingressam no sistema associados a uma unidade de referência: um quilograma de produto (“no portão”, correspondente à média da produção europeia). Neles, todos os fluxos econômicos de entrada⁷ são rastreados até a sua fonte no meio ambiente, incluindo processos a montante quanto sejam necessários. Portanto, as bases de dados de ICV são uma lista de fluxos elementares acumulados, quando todas as operações são rastreadas de volta para a extração de matérias-primas e recursos primários da natureza, de maneira que o único fluxo econômico ou transformado dos sistemas analisados é a sua saída: 1 kg de produto (PlasticsEurope, Metodologia de Ecoperfis, 2011) (Figura 3).

⁷ Na linguagem da Análise de Ciclo de Vida, os fluxos de entradas são diferenciados entre econômicos ou de produto e elementares. Os primeiros se referem àqueles insumos previamente transformados que passam de um processo a outro. Os fluxos elementares correspondem aos insumos na sua forma natural, assim como extraídos diretamente do meio ambiente.

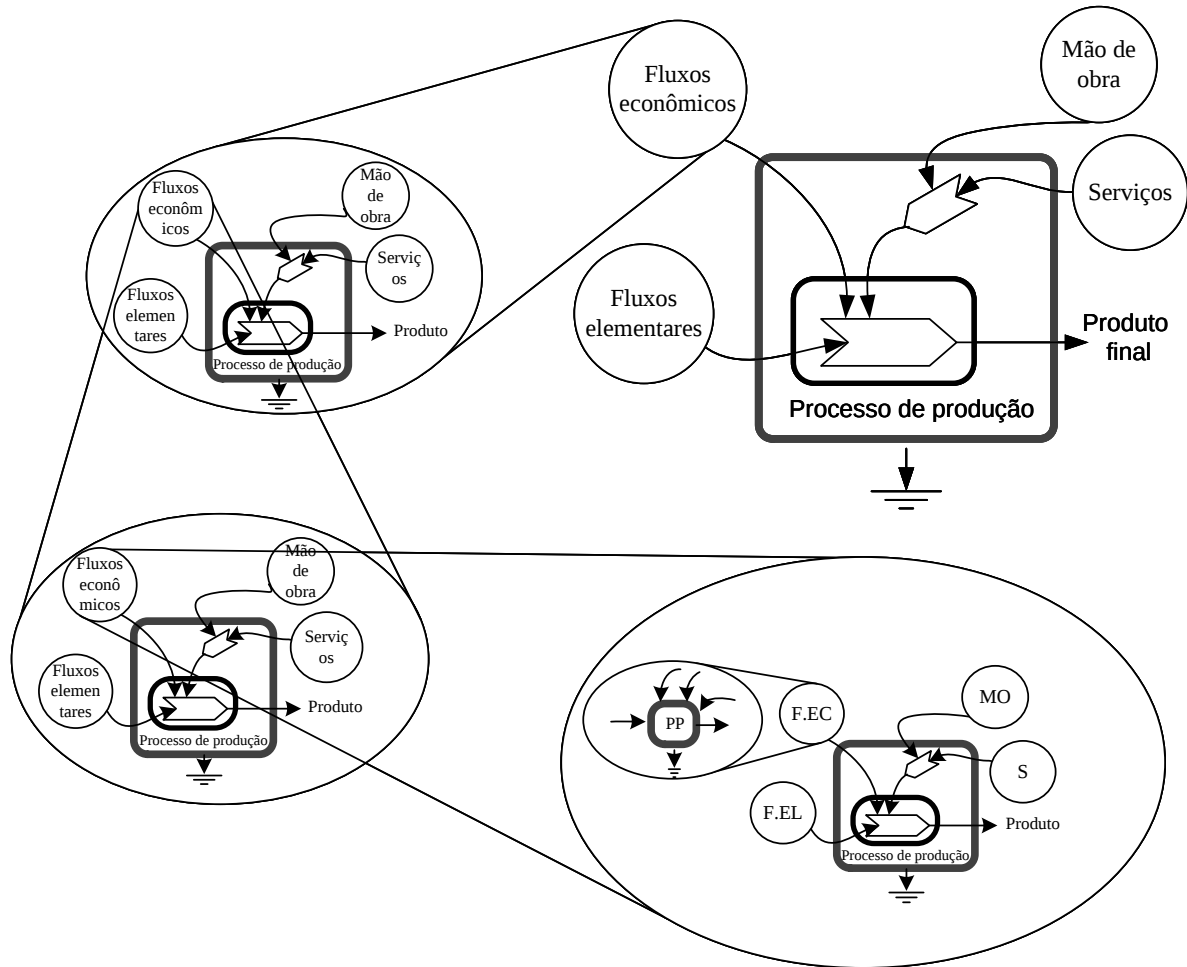


Figura 3 - Fluxos elementares do sistema de produção ao longo do ciclo de vida dos produtos (figura adaptada de Ulgiati; Brown, 2014)

Em coerência com as características dos ICV que suportam a presente avaliação, é possível desenhar um diagrama geral que representa a todos e a cada um dos sistemas de produto analisados. Desse modo, a Figura 4 constitui o diagrama de energia que se aplica a cada um dos sistemas de produto, refletindo a interação dos diferentes fluxos elementares com o sistema e incluindo as entradas de mão de obra e serviços.

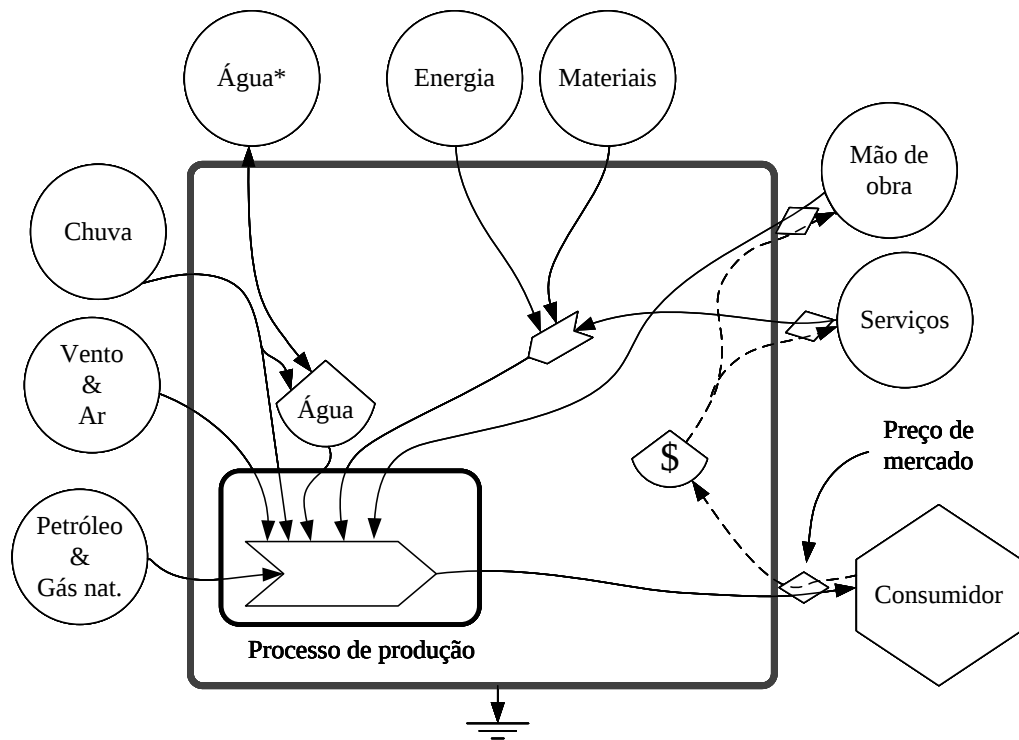


Figura 4- Diagrama de energia para os onze produtos estudados.

* Água de diferentes fontes: lago, mar, poço e rio.

No que se refere à fonte, os dados que pertencem aos processos que se encontram fora do controle operacional ou de tipo *background*, ou onde há uma grande dificuldade na obtenção de dados primários, provêm da informação registrada em bases de dados formais de ICV, disponíveis, pública ou comercialmente, como são as bases de dados da *European Reference Life Cycle Database* (ELCD), *Ecoinvent v 2.2* ou similares. A informação sobre energia e combustíveis foi principalmente obtida da *International Energy Agency* (IEA)⁸. Em contrapartida, os dados primários, ou dados *foreground*, que se encontram sob controle operacional dos produtores, provêm dos questionários aplicados a companhias membros e associadas à *PlasticsEurope*. As tabelas de ICV e, portanto, os ecoperfis, são consolidados conforme as normas e os padrões de qualidade estabelecidos pela ISO 14040-44 e o *International Reference Life Cycle Data System* (ILCD) *handbook* (*PlasticsEurope, Metodologia de Ecoperfis*, 2011).

Vários processos são levados em conta dentro dos limites de análise “berço até o portão” dos ICV (*PlasticsEurope, Metodologia de Ecoperfis*, 2011):

- Extração de recursos não renováveis.

⁸ IEA Website: www.iea.org (energy information center).

- Crescimento e colheita de recursos renováveis.
- Refino, transferência e armazenamento de recursos extraídos ou colhidos para matéria-prima da produção.
- Reciclagem de resíduos ou materiais secundários para uso em produção.
- Refino de recursos não renováveis e renováveis para energyware (energia como commodity).
- Processos de produção.
- Todos os processos de transporte relevantes de materiais, combustíveis e produtos em todas as etapas.
- Gestão de fluxos de resíduos relevantes ou da poluição gerada por processos dentro dos limites do sistema.

O último processo da lista anterior não foi levado em consideração neste trabalho. Dados sobre mão de obra, infraestrutura e manutenção de prédios, veículos e maquinaria encontram-se fora dos limites de análise dos ICV. Similarmente, a gestão de final de vida dos plásticos também está fora dos limites do sistema, por exemplo, processos de recuperação e reaproveitamento de grânulos de polímeros reciclados (PlasticsEurope, Metodologia de Ecoperfis, 2011).

O nível de detalhe e a consistência da informação relacionada nos ICVs europeus definem o critério para a escolha destas bases de dados, sobre outras de diferentes regiões ou países. Além disso, como mencionado anteriormente, tal informação coletada cumpre com requisitos estabelecidos de qualidade e possui uma abrangência que se estende à maioria dos produtores dessa região.

As bases de dados de ICV foram adaptadas à linguagem usada pela análise em emerggia. A nomenclatura original não se manteve de maneira exata, mas foi adaptada e levemente modificada para concordância com o procedimento de contabilidade em emerggia. No entanto, as quantidades por insumo ao sistema permaneceram inalteradas. Quanto à estrutura, foram adicionadas colunas que correspondem às informações sobre aspectos da emerggia e à ordem dos itens, classificados e organizados segundo a sua procedência de fontes renováveis (R) e não renováveis (N). Além disso, foram adicionadas as colunas relativas aos resultados em emerggia, derivados das operações entre as intensidades e as UEVs de cada insumo. Desse modo, as tabelas dos sistemas de produto envolvem uma hibridização de dados de anteriores análises em emerggia e bases de dados de ICV dos ecoperfis da indústria

européia. Por conseguinte, o tratamento dos dados, nesta avaliação, representa um trabalho de adequação e integração de bases de dados de origens diferentes, que conduz a uma padronização da informação e a uma representação adequada em emergia dos onze sistemas de produto analisados. Obstáculos, limitações, restrições e pontos críticos da complementariedade ou integração dos métodos de ACV e emergia são discutidos em Raugéi et al. (2014) e Rugani; Benetto (2012).

Em resumo, onze tabelas de emergia foram criadas, uma para cada sistema de produto independente. Essas tabelas não representam fluxos de insumos de um processo anterior para um posterior, como tipicamente visto no concernente às cadeias de produção. Ao invés disso, as quantidades relativas por insumo são quantidades acumuladas que resultam do rastreamento ao longo das transformações até a fonte na natureza. Por conseguinte, todos os sistemas de produto tendem a estar suportados nos mesmos fluxos elementares, uma vez que têm a mesma origem na natureza. Algumas variações na sequência dessas informações nas bases de dados, quando analisadas como cadeia de produção, se devem ao fato de ICVs de referência haverem sido realizados em diferentes períodos de tempo, por distintos analistas e levando em conta diferentes considerações quanto a dados de tipo *background* e *foreground*.⁹

⁹ Associação Europeia de Produtores de Plásticos, PlasticsEurope. Eco-profiles. <http://www.plasticseurope.org>

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Contabilidade ambiental em energia do sistema de produção de resina PET para garrafas

As Tabelas 2 e 3, do petróleo e do PET, respectivamente, além de representar o começo e o final da cadeia de produção, são apresentadas para ilustrar a composição e a ordem em que os fluxos foram inventariados¹⁰. Dessa maneira, todas as tabelas, neste trabalho, conservam uma estrutura similar aos ecoperfis da indústria plástica europeia, embora algumas modificações em relação à nomenclatura e estrutura das bases de dados de referência tenham sido feitas para esta análise.

Tabela 2 - Contabilidade ambiental em energia da produção de 1 kg de petróleo

	Insumo	Quantidade	Unidade	Classe	UEV* (sej/unidade)	Energia (sej)	% de energia por insumo
1	Água-abastecimento público	3,29E-01	J	R	6,89E+04	2,27E+04	< 0,1
2	Água-Mar	8,39E-02	J	R	5,36E+04	4,50E+03	< 0,1
3	Água-o.n.e	6,55E+01	J	R	6,89E+04	4,51E+06	< 0,1
4	Água-Poço natural	8,65E-05	J	R	6,89E+04	5,96E+00	< 0,1
5	Água-Rio	2,12E-07	g	R	3,41E+05	7,22E-02	< 0,1
6	Ar	3,70E-07	g	R	8,67E+07	3,21E+01	< 0,1
7	Energia das marés	8,71E+00	J	R	2,83E+04	2,46E+05	< 0,1
8	Energia em biomassa	1,67E+04	J	R	6,75E+04	1,13E+09	< 0,1
9	Energia geopotencial da água	5,80E+03	J	R	1,35E+05	7,82E+08	< 0,1
10	Energia geotermica	2,54E+00	J	R	4,52E+05	1,15E+06	< 0,1
11	Energia cinética do vento	7,87E+02	J	R	9,90E+04	7,78E+07	< 0,1
12	Energia solar	9,50E-03	J	R	1,00E+00	9,50E-03	< 0,1
13	Hidrogênio	2,77E-02	J	R	1,15E+05	3,19E+03	< 0,1
14	Madeira	1,47E-03	J	R	1,04E+04	1,53E+01	< 0,1
15	Nitrogênio	3,39E-04	g	R	1,17E+10	3,96E+06	< 0,1
16	Oxigênio	8,07E-05	g	R	8,67E+07	7,00E+03	< 0,1
17	Areia	8,28E-08	g	N	1,68E+09	1,39E+02	< 0,1
18	Argila	4,43E-09	g	N	4,80E+09	2,13E+01	< 0,1
19	Baritas	2,63E-06	g	N	1,68E+09	4,42E+03	< 0,1
20	Bauxita	1,81E-05	g	N	1,44E+09	2,60E+04	< 0,1
21	Bentonita	3,31E-06	g	N	4,80E+09	1,59E+04	< 0,1
22	Calcário	9,20E-04	g	N	1,68E+09	1,55E+06	< 0,1

¹⁰ Apresentam-se somente duas tabelas para facilitar a leitura e evitar os textos monótonos e repetitivos. Todas as tabelas são relacionadas no Anexo B.

23	Carvão	3,21E+05	J	N	1,32E+05	4,23E+10	0,6
24	Cascalho	1,62E-05	g	N	8,40E+08	1,36E+04	< 0,1
25	Chumbo	3,38E-05	g	N	4,80E+11	1,62E+07	< 0,1
26	Cloreto de potássio	1,37E-07	g	N	4,97E+09	6,81E+02	< 0,1
27	Cloreto de sódio	8,84E-05	g	N	1,68E+09	1,49E+05	< 0,1
28	Cobre	1,85E-09	g	N	9,80E+10	1,81E+02	< 0,1
29	Cromo	6,85E-11	g	N	1,50E+11	1,03E+01	< 0,1
30	Dolomita	5,38E-05	g	N	1,85E+10	9,95E+05	< 0,1
31	Enxofre	3,42E-05	g	N	2,08E+10	7,11E+05	< 0,1
32	Feldspato	9,32E-37	g	N	1,68E+09	1,57E-27	< 0,1
33	Ferro	4,40E-03	g	N	1,20E+10	5,28E+07	< 0,1
34	Ferro-manganês	4,00E-06	g	N	3,50E+11	1,40E+06	< 0,1
35	Fluorita	3,27E-07	g	N	8,36E+08	2,73E+02	< 0,1
36	Fosfato	8,38E-12	g	N	2,99E+10	2,50E-01	< 0,1
37	Gás natural	1,51E+06	J	N	1,70E+05	2,56E+11	3,7
38	Giz (CaCO ₃)	4,93E-32	g	N	1,13E+07	5,54E-25	< 0,1
39	Granito	3,02E-13	g	N	8,40E+08	2,54E-04	< 0,1
40	Lignita	2,76E-02	J	N	1,11E+05	3,07E+03	< 0,1
41	Mercurio	4,25E-11	g	N	4,20E+13	1,78E+03	< 0,1
42	Níquel	2,95E-14	g	N	2,00E+11	5,90E-03	< 0,1
43	Olivina	4,13E-05	g	N	1,68E+09	6,94E+04	< 0,1
44	Petróleo	4,53E+07	J	N	1,48E+05	6,70E+12	95,7
45	Rutilo	7,08E-32	g	N	1,68E+09	1,19E-22	< 0,1
46	Sulfato de cálcio (CaSO ₄)	2,46E-08	g	N	1,68E+09	4,13E+01	< 0,1
47	Talco	5,89E-26	g	N	2,80E+10	1,65E-15	< 0,1
48	Turfa	1,31E-01	J	N	3,19E+04	4,18E+03	< 0,1
49	Uranio	3,98E-04	g	N	1,60E+11	6,37E+07	< 0,1
50	Xisto	6,95E-08	g	N	1,68E+09	1,17E+02	< 0,1
51	Zinco	1,24E-06	g	N	7,20E+10	8,90E+04	< 0,1
52	Petróleo (PRODUTO)				7,00E+09	7,00E+12	100,0

*Todas as UEVs são relacionadas à linha base 15,83x 10²⁴ sej/ano.

Linha 1: conserva-se a nomenclatura original do insumo, mas considera-se como um fluxo de entrada elementar R, com o fim de manter a coerência com o estabelecido nos ecoperfis.

Linha 3: o.n.e: origem não especificada

Tabela 3 - Contabilidade ambiental em emergia da produção de 1 kg de PET

	Insumo	Quantidade	Unidade	Classe	UEV* (sej/unidade)	Emergia (sej)	% de emergia por insumo
1	Água de processo-o.n.e	1,77E+4	J	R	6,89E+04	1,22E+9	< 0,1
2	Água resfriamento-o.n.e	5,12E+4	g	R	2,70E+05	1,39E+10	0,1
3	Água-Lago	1,52E+3	g	R	4,52E+05	6,85E+8	< 0,1
4	Água-Mar	2,77E+2	J	R	5,36E+04	1,48E+7	< 0,1
5	Água-Poço natural	2,66E+3	J	R	6,89E+04	1,83E+8	< 0,1

6	Água-Rio	1,77E+3	g	R	3,41E+05	6,03E+8	< 0,1
7	Energia em biomassa	4,22E+5	J	R	6,75E+4	2,85E+10	0,3
8	Energia geopotencial da água	3,39E+5	J	R	1,35E+5	4,56E+10	0,4
9	Energia outros R	4,55E+5	J	R	9,18E+4	4,17E+10	0,4
10	Madeira	9,64E+3	J	R	1,04E+4	1,00E+8	< 0,1
11	Alumínio	1,14E-2	g	N	5,40E+9	6,15E+7	< 0,1
12	Areia	5,61E-5	g	N	1,68E+09	9,43E+4	< 0,1
13	Argila	1,95E-1	g	N	4,80E+09	9,39E+8	< 0,1
14	Barita	2,67E-2	g	N	1,68E+9	4,49E+7	< 0,1
15	Basalto	3,61E-7	g	N	7,56E+9	2,73E+3	< 0,1
16	Bórax	1,63E-7	g	N	1,68E+9	2,75E+2	< 0,1
17	Brometo de sódio	4,40E-1	g	N	1,68E+09	7,39E+8	< 0,1
18	Cádmio	6,54E-9	g	N	3,40E+13	2,22E+5	< 0,1
19	Calcita	9,02E+0	g	N	1,68E+9	1,51E+10	0,1
20	Carbono, em matéria orgânica, no solo	3,34E-5	g	N	2,77E+09	9,25E+4	< 0,1
21	Carvão	2,45E+6	J	N	1,32E+05	3,24E+11	3,0
22	Cascalho	6,65E+0	g	N	8,40E+08	5,59E+9	0,1
23	Caulinita	6,87E-4	g	N	1,68E+09	1,15E+6	< 0,1
24	Chumbo	4,31E-8	g	N	4,80E+11	2,07E+4	< 0,1
25	Cloreto de potássio	4,02E-5	g	N	4,97E+09	2,00E+5	< 0,1
26	Cloreto de sódio	1,30E+1	g	N	1,68E+09	2,19E+10	0,2
27	Cobalto	1,80E-1	g	N	1,30E+11	2,34E+10	0,2
28	Cobre	1,07E-3	g	N	9,80E+10	1,05E+8	< 0,1
29	Colemanita	4,53E-6	g	N	1,68E+09	7,62E+3	< 0,1
30	Crisotila	2,97E-4	g	N	1,68E+09	4,98E+5	< 0,1
31	Cromo	1,13E-2	g	N	1,50E+11	1,70E+9	< 0,1
32	Diatomita	2,00E-10	g	N	1,68E+09	3,36E-1	< 0,1
33	Dióxido de carbono	4,80E+1	g	N	8,87E+7	4,26E+9	< 0,1
34	Dióxido de titânio	4,89E-3	g	N	3,82E+10	1,87E+8	< 0,1
35	Dolomita	2,53E-3	g	N	1,85E+10	4,69E+7	< 0,1
36	Enxofre	4,60E-2	g	N	2,08E+10	9,58E+8	< 0,1
37	Estanho	3,01E-8	g	N	1,70E+12	5,11E+4	< 0,1
38	Estibina	2,71E-1	g	N	1,68E+09	4,55E+8	< 0,1
39	Feldspato	2,07E-9	g	N	1,68E+09	3,48E+0	< 0,1
40	Ferro	4,18E-2	g	N	1,20E+10	5,02E+8	< 0,1
41	Flúor	8,13E-3	g	N	1,68E+09	1,37E+7	< 0,1
42	Fluorita	8,37E-3	g	N	8,38E+08	7,02E+6	< 0,1
43	Fósforo	3,25E-2	g	N	2,07E+10	6,71E+8	< 0,1
44	Gás natural	1,67E+7	J	N	1,78E+05	2,97E+12	27,6
45	Gesso	3,19E-6	g	N	2,85E+09	9,10E+3	< 0,1
46	Granito	2,07E-9	g	N	8,40E+08	1,74E+0	< 0,1
47	Índio	1,03E-10	g	N	4,03E+11	4,15E+1	< 0,1
48	Kieserita	1,69E-6	g	N	1,68E+09	2,84E+3	< 0,1
49	Lignita	1,39E+6	J	N	1,11E+05	1,54E+11	1,4
50	Magnésio	3,73E-15	g	N	1,68E+09	6,26E-6	< 0,1

51	Magnesita	6,86E-4	g	N	1,68E+09	1,15E+6	< 0,1
52	Manganês	3,15E-1	g	N	3,50E+11	1,10E+11	1,0
53	Mercurio	2,71E-5	g	N	4,20E+13	1,14E+9	< 0,1
54	Molibdênio	4,75E-4	g	N	7,00E+11	3,32E+8	< 0,1
55	Níquel	2,63E-2	g	N	2,00E+11	5,26E+9	< 0,1
56	Nitrato de sódio	3,33E-12	g	N	1,68E+09	5,60E-3	< 0,1
57	Olivina	7,05E-7	g	N	1,68E+09	1,19E+3	< 0,1
58	Ouro	2,44E-14	g	N	5,00E+11	1,22E-2	< 0,1
59	Paládio	1,13E-5	g	N	1,20E+11	1,36E+6	< 0,1
60	Petróleo	4,49E+7	J	N	1,56E+05	7,00E+12	64,9
61	Platina	1,95E-9	g	N	3,70E+11	7,20E+2	< 0,1
62	Prata	6,51E-14	g	N	4,50E+11	2,93E-2	< 0,1
63	Rênio	4,83E-10	g	N	8,93E+12	4,31E+3	< 0,1
64	Rocha metamórfica, grafita	8,31E-6	g	N	1,68E+09	1,39E+4	< 0,1
65	Ródio	1,74E-9	g	N	1,20E+12	2,09E+3	< 0,1
66	Rutilo	2,07E-9	g	N	1,68E+09	3,48E+0	< 0,1
67	Sulfato de sódio	2,24E-3	g	N	1,40E+09	3,13E+6	< 0,1
68	Talco	9,79E-5	g	N	2,80E+10	2,74E+6	< 0,1
69	Tântalo	2,36E-14	g	N	1,70E+11	4,02E-3	< 0,1
70	Telúrio	3,20E-15	g	N	5,04E+13	1,61E-1	< 0,1
71	Turfa	1,50E+1	J	N	3,19E+4	4,79E+5	< 0,1
72	Ulexita	1,21E-14	g	N	1,68E+09	2,02E-5	< 0,1
73	Urânio	6,78E-3	g	N	1,60E+11	1,08E+9	< 0,1
74	Xisto	6,13E-6	g	N	1,68E+09	1,03E+4	< 0,1
75	Zinco	8,11E-4	g	N	7,20E+10	5,84E+7	< 0,1
76	Zircônio	3,25E-14	g	N	3,18E+10	1,03E-3	< 0,1
77	PET (PRODUTO)				1,08E+10	1,08E+13	100,0

*Todas as UEVs são relacionadas à linha base $15,83 \times 10^{24}$ sej/ano.

Linha 1 e 2: o.n.e: origem não especificada.

Linha 9: corresponde às energias não renováveis (sol, geotérmica e cinética do vento), que foram reportadas de maneira conjunta no ICV do PET. No anexo C.11, relaciona-se o cálculo pertencente a esse item.

A primeira coluna das tabelas corresponde à numeração por insumo, seguida pelo tipo de insumo e a sua respectiva quantidade em unidades de massa ou energia¹¹. Depois, classificam-se os insumos pela sua classe ou tipo de recurso (R e N), seguido das suas UEVs, expressas em sej/unidade. A penúltima coluna das Tabelas 2 e 3 corresponde à energia calculada por insumo, resultado que depende da intensidade acumulada para a obtenção de 1 kg de produto, relacionada com a eficiência dos processos produtivos envolvidos. A última coluna corresponde à porcentagem de contribuição de cada insumo em relação à energia total do produto, o que permite a identificação daqueles de maior importância para o sistema. A

¹¹ No Anexo C, sobre o memorial de cálculo, relacionam-se as conversões necessárias sobre as unidades originais, em conformidade com as unidades das UEV usadas nas tabelas.

Tabela 4 é um resumo das tabelas do Anexo B, que relaciona as energias totais por quilograma de produto e as suas respectivas UEVs.

Tabela 4 - Energia total e UEV por produto

Produto	Energia*/ $\times 10^{12}$ (sej)	UEVs/ $\times 10^9$ (sej/g)
Petróleo	7,00	7,00
Gás natural	9,06	9,06
Nafta	7,83	7,83
Pygas	10,28	10,28
Xileno	8,99	8,99
Para xileno	10,57	10,57
Etileno	11,41	11,41
Óxido de etileno	9,75	9,75
Etileno glycol	7,26	7,26
PTA	8,85	8,85
PET	10,78	10,78

*Energia total para 1 kg de produto.

A partir dos resultados em energia, é possível identificar a alta dependência dos produtos em relação aos recursos fósseis, especialmente no petróleo, o qual, dentre todos eles, contribui com mais de 64% da energia total requerida por produto (porcentagem correspondente ao sistema de produto do PET). As características próprias dos processos petroquímicos fazem com que esses resultados sejam, de certa forma, esperados, uma vez que os produtos da indústria petroquímica são obtidos por meio de uma série de etapas onde o petróleo bruto entra como principal matéria-prima na fase de refinamento, sofrendo diferentes transformações físico-químicas na separação, conversão e tratamento do recurso. Dessa forma, nos processos subsequentes, como craqueamento, reforma, síntese e produção de compostos, obtêm-se diferentes produtos, todos eles com base na estrutura molecular de um único material: o petróleo (FAHIM et al., 2010). Menores parcelas do petróleo e do gás natural satisfazem as necessidades de energia e/ou combustíveis para a operação dos processos de produção e o transporte entre eles (PlasticsEurope, Ecoperfis), contribuindo, dessa maneira, em menor intensidade e, portanto, menor energia, com os sistemas de produto.

Se se relaciona a análise em energia desta avaliação com a ACV de Madival et al. (2009), é possível observar, respectivamente, que diferentes resultados sobre o desempenho

ambiental dos processos provêm dos distintos usos do mesmo recurso: o petróleo como matéria-prima e o petróleo como combustível para o transporte. Devido a isso, uma parte da consistência das decisões estratégicas baseia-se em resultados multicritério, uma vez que abordagens diferentes apontam sobre diferentes fontes de desempenho, quando se analisam processos similares.

Como mostrado anteriormente na Figura 2, é possível observar que a cadeia de produção do PET se encontra dividida em duas subcadeias. Esse aspecto reforça a identificação da contribuição em energia, progressivamente menor, do petróleo em relação ao gás natural e, por sua vez, esses dois insumos, de maneira conjunta, contribuem com menor energia enquanto se avança na cadeia de produção (Figura 5). Em outras palavras, a porcentagem de contribuição do petróleo diminui e a do gás natural aumenta, na medida em que se avança na cadeia, e a porcentagem conjunta decresce, apresentando valores próximos dos 99% no início, até valores próximos dos 92% nos processos finais. A porcentagem restante encontra-se distribuída em fluxos elementares de outro tipo, como os de fontes minerais e outros de origem renovável, como a água e a biomassa (como observado nas Tabelas 2 e 3 e no Anexo B).

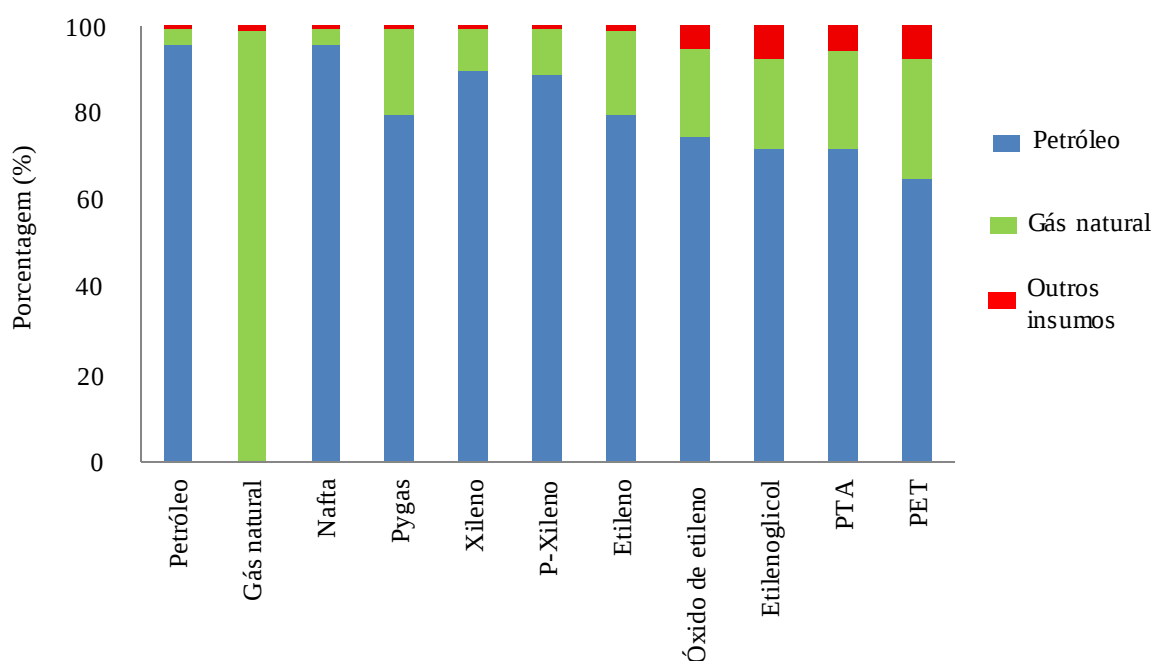


Figura 5 - Porcentagem de contribuição em energia (sej/sej) por insumo

As variações na intensidade do uso dos recursos, quando analisado o sistema na forma de cadeia, podem ter várias explicações relativas às características próprias dos processos de transformação, na medida em que se aumenta seu nível de complexidade. Isso significa que os processos à frente da cadeia tendem a ser mais complexos e, portanto, demandam maior participação e diversificação de insumos, além das matérias-primas. Por exemplo, a relação variável entre as contribuições de petróleo e gás natural possivelmente resulta da participação direta do gás natural no processo de craqueamento da nafta e da utilização de ácido acético na produção do PTA, o qual, em um processo anterior, é derivado do metanol, que, por sua vez, é obtido do gás natural. Similarmente, catalizadores, como manganês e cobalto, são utilizados em maior quantidade na produção do PTA, especificamente na oxidação do para-xileno (PlasticsEurope, 2014).

4.1.1 Valores unitários de energia do sistema de produção de PET

Na Tabela 5, comparam-se as UEV estimadas para o PET e dez dos seus precursores com as UEVs dos mesmos produtos, mas como aproximações baseadas, somente, no petróleo e no gás natural. A forte dependência dos processos no petróleo e no gás natural, os quais, conjuntamente, têm uma contribuição acima dos 92 % da energia total em todos os sistemas analisados (Figura 5), permite estimar medidas em energia com base só nesses dois insumos principais. Existe uma maior dispersão medida pela variação percentual entre as UEVs dos sistemas de produto finais. Isso se deve à maior contribuição em energia de outros insumos (Figura 5), relacionada diretamente à maior intensidade relativa, o que afeta a precisão da aproximação nesses produtos. No entanto, pode-se sugerir que as UEVs estimadas com base no petróleo e no gás natural sejam úteis em futuras análises de sistemas similares e processos à jusante relacionados à indústria petroquímica, sobretudo na presença de um alto grau de incerteza na informação ou grande dificuldade na obtenção de dados detalhados sobre os processos.

Tabela 5- UEVs calculadas com base no petróleo e no gás natural e com base em todos os insumos dos sistemas de produto

Produto	UEV / $\times 10^9$ (sej/g)		Variação percentual (%)*
	Petróleo e GN	Todos os insumos	
Petróleo	6,96	7,00	0,6
Gás natural	8,93	9,06	1,4
Nafta	7,78	7,83	0,6
Pygas	10,17	10,28	1,1
Xileno	8,93	8,99	0,7
Paraxileno	10,46	10,57	1,0
Etileno	11,25	11,41	1,4
Óxido de etileno	9,23	9,76	5,4
Etilenoglicol	6,71	7,26	7,6
PTA	8,34	8,85	5,9
PET	9,97	10,78	7,5

*Valor calculado como a porcentagem de variação sobre a UEV que considera todos os insumos.

Destaca-se que as UEVs tendem a ser maiores, partindo dos sistemas de produtos primários para os sistemas finais. Porém, não se observa um aumento gradativo das UEVs como esperado, quando a análise é realizada seguindo uma sequência de cadeia de produção. Isso é observado na Figura 6, onde se considera a ordem estrita dos processos de produção, na qual se analisa a evolução das UEVs seguindo a sequência das subcadeias de produção 1 e 2 (Figura 2). O etilenoglicol e o PTA também são incluídos nas subcadeias contrárias, devido ao fato de ambos serem componentes imprescindíveis da polimerização para a obtenção do PET, como produto final da cadeia.

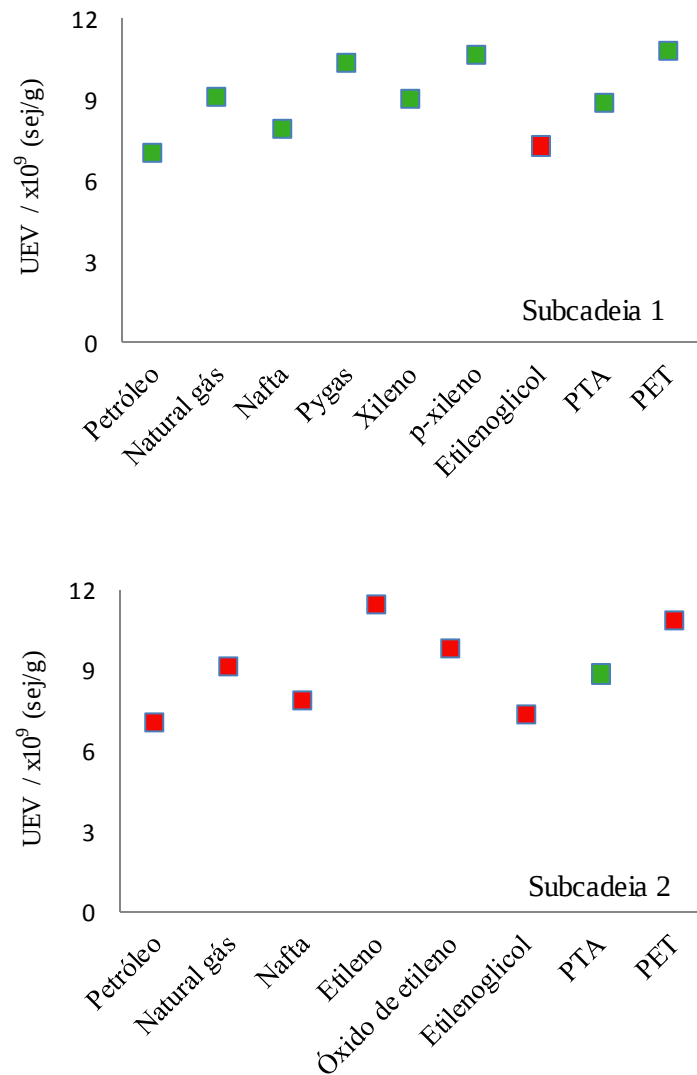


Figura 6 - UEVs das subcadeias de produção 1e 2

No caso de um sistema de produção em cadeia (Figura 2), onde os produtos transformados são transferidos de processo a processo como matéria-prima, suportando os sistemas mais complexos, poder-se-ia assumir que aqueles produtos no início da cadeia apresentassem, estritamente, uma emergência menor e, portanto, menores UEVs que aquelas derivadas dos processos finais. Explica-se: na medida em que são acrescentadas mais etapas de transformação, mais emergência será requerida, já que uma maior quantidade de insumos será necessária para suprir as produções da cadeia (ODUM, 1996).

No entanto, neste estudo, apresenta-se uma análise diferenciada, na qual o sistema único de produção é dividido em onze sistemas de produto separados, em que cada intermediário é o produto final em uma quantia de um quilograma, representados ICV

independentes, que contêm informação coletada em períodos de tempo diferentes e com considerações específicas relativas à fonte dos dados, já mencionada. Por conseguinte, as divergências nos resultados baseados nos ICV podem ser explicadas pelas distintas configurações da produção associadas à informação coletada e/ou aos diferentes critérios adotados pelos analistas. Esses resultados não confirmam o estabelecido por Rugani; Benetto (2012), que destacam a consistência das informações contidas em ICVs, para melhorar a precisão das estimativas em energia. Entretanto, confirma-se a necessidade do ajuste das diferenças entre ambos os métodos, no que concerne aos procedimentos de alocação em processos multiprodutos e aos limites do sistema.

4.2 Relação entre as UEV estimadas e os valores da literatura

Na Tabela 6, relacionam-se as UEV calculadas e aquelas previamente estimadas por outros autores, disponíveis na literatura e nas bases de dados em energia. Por meio dessa comparação, pretende-se apresentar a aproximação entre os valores, mas realça-se que diferentes análises em energia derivam de diferentes resultados, uma vez que a energia é sensível a fatores internos e externos da produção. No entanto, é importante destacar que, embora diversos aspectos metodológicos tenham sido considerados, os resultados entre uns e outros, sob o ponto de vista da energia, são próximos, mantendo-se na mesma ordem de magnitude numérica.

Tabela 6- UEVs calculadas e comparadas com os valores da literatura

Produto	UEVs/ $\times 10^9$ (sej/g)	UEVs* / $\times 10^9$ da literatura (sej/g) [1]	UEVs / $\times 10^9$ da literatura (sej/g) [2]	Referência [1]	Referência [2]
Petróleo	7,00	4,17	7,09	Bastianoni et al. (2005)	Brown et al. (2011)
Gás natural	9,06	3,72	8.90	Bastianoni et al. (2005)	Brown et al. (2011)
Nafta	7,83	5,29		Bastianoni et al. (2009)	
Pygas	10,28				
Xileno	8,99				
Para xileno	10,57				
Etileno	11,41	18,6		Sha et al. (2015)	
Óxido de etileno	9,75				
Etileno glicol	7,26				
PTA	8,85				
PET	10,78	57,7		Almeida et al. (2010)	

* As UEVs da literatura foram relacionadas, excluindo-se as contribuições de mão de obra e serviços.

Valores caloríficos usados para as conversões das UEV de sej/J a sej/g: 4.5×10^4 J /g para petróleo, $5,0 \times 10^4$ J /g para o gás natural, e, $4,7 \times 10^4$ J /g para a nafta.

Especificamente, as diferenças entre os valores podem ser atribuídas às considerações iniciais usadas para o cálculo (fronteiras dos sistemas, alocações, dentre outras) e às características intrínsecas dos processos (fontes de energia, localização, dentre outras.). Por conseguinte, tanto as divergências dos resultados próprios desta avaliação quanto as que se observam ao compará-los com resultados encontrados na literatura poder-se-iam explicar por três aspectos principais: a propagação dos erros na análise; as diferentes formas de produção associadas à informação coletada; e os diferentes critérios dos analistas.

No caso do etileno, Sha et al. (2015) realizam uma análise convencional dos processos, assumindo um rendimento de 31 % do etileno baseado na nafta, e consideram os coprodutos do processo de craqueamento a vapor como propileno, butadieno e BTX¹². Assim, toda a energia resultante é atribuída a cada coproduto por igual, e os valores das UEVs (sej/g) só dependem das quantidades produzidas. Diferentemente, a energia baseada em ICV é o resultado do rastreamento dos fluxos de entrada do sistema de produção do etileno (assim como os outros sistemas de produto). Portanto, ao invés da conversão de rendimento da

¹² Composto formado pela mistura de hidrocarbonetos aromáticos: benzeno, tolueno e xileno.

matéria-prima, entre os diferentes coprodutos, leva-se em conta o conteúdo da matéria-prima elementar no produto, ou seja, o petróleo, rastreado de volta até a sua etapa de extração.

No presente trabalho, a nafta e outros derivados do petróleo são considerados como *splits*¹³ do petróleo com diferentes densidades e não como coprodutos do processo de refinamento, de acordo com as observações feitas por Bastianoni et al. (2009). Essa consideração se deve ao fato de que, embora distintas funcionalidades desses produtos possam relacioná-los a algumas características dos coprodutos, existe a possibilidade de se mudarem as proporções em que os derivados do petróleo são produzidos, de maneira que, de uma mesma quantidade de petróleo, é possível obter qualquer combinação de derivados. Dessa forma, o volume e o tipo de produção são determinados pelas potenciais configurações das plantas de refinamento, seguindo tendências de demanda de mercado e tipo de matéria-prima disponível, dependendo, principalmente, das decisões de investimento e custos de tratamento da matéria-prima. Considerando isso, Bastianoni e colegas estimam as contribuições em energia de tais custos, concluindo que a sua influência na energia total do sistema é insignificante. Por conseguinte, eles poderiam ser modificados, independentemente dos efeitos gerados nos resultados, o que permitiria assumir-se qualquer combinação de derivados sem se gerar uma grande incerteza na análise.

As UEV podem ser utilizadas como medidas úteis em comparações da eficiência relativa de sistemas semelhantes com diferentes tecnologias de produção. Em relação à energia específica do PET, as diferenças observadas correspondem, principalmente, aos níveis dissimilares de eficiência no uso de recursos para a produção. Portanto, UEVs menores são resultado das maiores eficiências na utilização de recursos em países ou regiões altamente industrializadas e com avançadas tecnologias de produção. No entanto, existe alguma incerteza ao se avaliarem e se compararem sistemas de produção de diferentes países ou regiões, uma vez que os resultados em energia não refletem, diretamente, as diferenças entre os sistemas analisados por outros aspectos do que os tecnológicos, por exemplo, políticos ou socioeconômicos. Dessa forma, os resultados da análise em energia podem auxiliar na seleção de tecnologias de produção com menores custos ambientais, ligados à intensidade no uso de recursos.

¹³ Separações de um fluxo de energia são conhecidas como *splits*. A cada um deles é atribuída uma parte da energia, conforme a sua participação(%) sobre o fluxo de energia total. Por outro lado, a cada coproduto de um processo se atribui o total da energia ao processo, portanto, ao estimar-se a energia total, não deveriam ser somadas as energias relativas aos coprodutos, para evitar um problema da dupla contagem (BROWN; HERENDEEN, 1996).

Os resultados também estabelecem um intervalo previsto para UEVs da indústria petroquímica, associadas a cadeias de produção similares. Desde o petróleo bruto para a resina de PET, a UEV aumenta em 53%, e todas as UEVs se encontram dentro de um intervalo entre $7,0 \times 10^9$ sej /g, do petróleo, e, $1,14 \times 10^{10}$ sej /g, do etileno, o derivativo com a maior energia demandada por grama dos produtos da cadeia. O intervalo estimado reduz o nível de incerteza nos resultados sobre UEVs baseadas em ICV para outras resinas plásticas e os seus precursores, reduzindo o trabalho alusivo à coleta de dados para estimativas das energias específicas nesse setor e oferecendo uma possível alternativa nas futuras pesquisas sobre sistemas de produção petroquímica.

4.3 Relação entre transformidades e a qualidade da energia

Odum (1996) define o trabalho como transformações de energia. Por conseguinte, uma energia de maior qualidade seria aquela capaz de realizar mais trabalho com menor energia, em um processo onde a energia aumenta com sucesivas transformações e a energia incorporada nos produtos diminui. Na Figura 7, observa-se a tendência linearmente decrescente das energias, ao longo da cadeia de produção, em função do aumento das transformidades calculadas com base no seu poder calorífico bruto. Esses resultados podem ser interpretados como medidas de qualidade da energia, seguindo o princípio da hierarquia da energia proposta por Odum (1996), na qual o universo está organizado em uma hierarquia das transformações da energia quantitativamente descritas pelas transformidades. Portanto, etapas de produção subsequentes em um sistema determinam posições mais adiante na escala da qualidade da energia em uma hierarquia, onde as transformidades são medidas dessa qualidade.

Na mesma figura, as transformidades são localizadas em escala logarítmica e relacionadas com a energia, onde o coeficiente de correlação (R^2) determina que 87% da transformidade se explicam pela energia dos produtos. No entanto, a relação não segue, estritamente, a ordem dos processos de transformação da cadeia, o que resulta inadequado afirmar o cumprimento do princípio estabelecido por Odum para este sistema e o tipo de energia considerada (energia liberada na forma de calor).

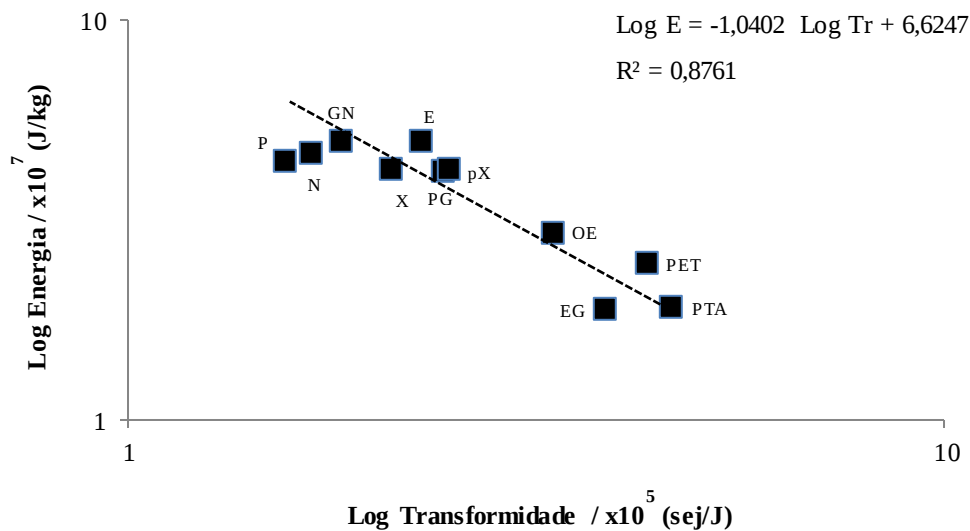


Figura 7- Energia dos intermediários da cadeia produtiva do PET em função da transformidade.

*P: petróleo; GN: gás natural; N: nafta; X: xileno; E: etileno; PG: pygas; pX: para-xileno; OE: óxido de etileno; EG: etilenoglicol

4.4 Contabilidade em energia para mão de obra e serviços

Inicialmente, a análise concentra-se somente em questões tecnológicas do sistema de produção, portanto o insumo da mão de obra se inclui a partir da contabilidade da energia metabólica dos trabalhadores, medida em joules. Com isso, evitam-se aspectos externos relacionados ao tipo de trabalhador, como experiência, formação, habilidades, entre outros, e todo tipo de fatores locais, que, direta ou indiretamente, influi no trabalho oferecido.

Dado que muitos produtos da indústria do refino e petroquímica são produzidos de maneira conjunta, não seria adequado assumir que um trabalhador se dedica, exclusivamente, a produzir um produto específico, e sim que sua participação, direta ou indireta, influi na produção de um conjunto de produtos. Portanto, o cálculo da energia da mão de obra é realizado sob a perspectiva das indústrias de extração do petróleo, gás natural, refino e petroquímica, que envolvem todos os produtos do sistema avaliado. Para isso, foram usados dados relativos não só à produção europeia nessas indústrias para um ano determinado (ano 2008) como também ao número de empregados para o mesmo ano (Tabela 7).

Tabela 7- Energia da mão de obra por indústria para o ano 2008

Item	Número de empregados / $\times 10^4$ (pessoas)	Produção / $\times 10^{10}$ (kg)	Mão de obra* / $\times 10^2$ (J/kg)	Energia M.O** / $\times 10^{10}$ (sej)
Petróleo	7,3	9,9	9,9	3,92
Gás Natural	7,3	17,2	5,7	2,25
Refinados do petróleo	12,8	62,2	2,8	1,10
Petroquímicos	30,9	10,2	40,7	16,1

Fonte: Eurostat (União Europeia), www.ec.europa.eu/eurostat; Petrochemicals Europe, www.petrochemistry.eu; International Energy Agency, www.iea.org

*O cálculo da energia metabólica da mão de obra (M.O) está detalhadamente relacionado no memorial de cálculo do Anexo D.

**A energia da M.O para produzir 1 kg de produto resulta da multiplicação da energia metabólica da M.O (J/kg) pela UEV $3,96 \times 10^7$ sej/J, calculada no Anexo D.1.

Considerando-se os resultados observados na Tabela 7, é possível determinar as energias dos produtos incluindo a mão de obra. No entanto, as diferenças entre os resultados com e sem mão de obra são insignificantes, como se observa na Tabela 8, onde a última coluna mostra a porcentagem de contribuição em energia da mão de obra em relação à energia total por produto. Resultados diferentes podem ser obtidos, se se consideram UEVs específicas para diferentes entradas de trabalho direto, mas, nesse caso, os resultados somente seriam úteis para decisões sobre o mercado no qual uma tecnologia dada pode ser implantada.

Tabela 8- Contabilidade em energia com e sem mão de obra

Produto (1 kg)	Energia/ $\times 10^{12}$ (sej)	Energia incluindo MO / $\times 10^{12}$ (sej)	%
Petróleo	7,00	7,04	0,6
Gás natural	9,06	9,09	0,2
Nafta	7,83	7,85	0,1
Pygas	10,28	10,44	1,6
Xileno	8,99	9,15	1,8
Para xileno	10,57	10,73	1,5
Etileno	11,41	11,57	1,4
Óxido de etileno	9,75	9,91	1,7
Etileno glycol	7,26	7,42	2,2
PTA	8,85	9,01	1,8
PET	10,78	10,94	1,5

Conjuntamente com as informações obtidas sobre a mão de obra, também são determinados os valores em energia dos serviços, que correspondem às entradas de trabalho

indireto aos sistemas de produto, isto é, a energia requerida para suportar o trabalho que, de maneira indireta, contribui com a produção final. Para isso, calculou-se uma EMR relativa à região europeia ($2,98 \times 10^{12}$ sej/\$), que representa a UEV do dinheiro para essa região específica no ano 2008 (Anexo E).

Tabela 9- Valores em energia incluindo a mão de obra e os serviços

Produto (1kg)	Energia da M.O $\times 10^{10}$ (sej)	Energia dos serviços* $\times 10^{12}$ (sej)	Energia com M.O & S $/\times 10^{12}$ (sej)	Contribuição da energia da M.O & S (%)
Petróleo	3,92	2,21	9,25	24%
Gás natural	2,25	1,88	10,97	17%
Nafta	1,10	2,35	10,19	23%
Pygas	16,13	2,94	13,38	23%
Xileno	16,13	2,66	11,81	24%
Para xileno	16,13	3,14	13,87	24%
Etileno	16,13	3,27	14,84	23%
Óxido de etileno	16,13	2,83	12,74	23%
Etileno glycol	16,13	2,12	9,55	24%
PTA	16,13	2,65	11,66	24%
PET	16,13	3,07	14,02	23%

*Produto da multiplicação da EMR pelos preços dos insumos relacionados no Anexo F.

A Tabela 9 exibe os resultados em energia obtidos referentes à mão de obra e aos serviços, requeridos para cada sistema de produto. Como pode ser observada, a fração de serviços em relação à mão de obra é, aproximadamente, cem vezes maior para os produtos que correspondem às indústrias de exploração e refino e, aproximadamente, dez vezes maior, para aqueles da indústria petroquímica. Os serviços, quando analisados na forma da cadeia de produção, refletem a mesma hierarquia da energia, observada anteriormente nos resultados em energia totais. Portanto, as maiores frações em energia dos serviços pertencem àqueles produtos que, desconsiderando mão de obra e serviços, mostravam uma maior energia por produto. Isso quer dizer que ambas as formas de contabilizar dependem, quase que exclusivamente, da intensidade dos insumos aos sistemas de produto, especialmente, do petróleo e do gás natural.

Na penúltima coluna da tabela, são exibidas as estimativas de energia, incluindo, conjuntamente, a mão de obra e os serviços. A última coluna corresponde à contribuição em energia desses insumos, em relação à energia total por sistema de produto, determinada na coluna anterior. Os resultados exibem uma porcentagem similar de produto a produto, entre 23% e 24%, com exceção do gás natural (17%), uma vez que, como indicado anteriormente, a dependência das intensidades entre o petróleo e o gás natural determina o resultado obtido e, nesse caso, as proporções relativas entre os dois insumos varia. Ou seja, ao contrário dos demais sistemas de produto, onde o petróleo é o insumo de maior intensidade, obviamente, na exploração do gás natural, o insumo base é o mesmo gás natural.

4.5 Energia e valor econômico

Considerando a energia como uma medida do valor intrínseco dos produtos, um mesmo sistema de produção pode, então, ser analisado por duas óticas diferentes de valoração. Os métodos em energia e econômico, embora tenham origens e medidas de valor diferentes, podem ser relacionados em assuntos de caráter prático e metodológico. Dessa maneira, ao se comparar o valor em energia com o valor econômico, pretende-se avaliar aspectos que favoreçam a complementariedade de ambas as abordagens, embora estas possuam características metodológicas diferentes¹⁴.

A Figura 8 mostra a sequência das transformidades (sej/J) e dos preços de mercado (\$/ton), quando o sistema é observado na forma de cadeia de produção. Identifica-se um aumento discreto na tendência das curvas ao longo da cadeia. Os valores das transformidades foram determinados dentro de um intervalo entre $1,56 \times 10^5$ sej/J e $4,61 \times 10^5$ sej/J, que correspondem ao petróleo e ao PTA, respectivamente. Os preços de mercado, determinados dentro de um intervalo entre $6,17 \times 10^2$ US\$/ton e $16,80 \times 10^2$ US\$/ton, para o gás natural e o PET, respectivamente, apresentam uma tendência crescente, na medida em que se avança na cadeia de produção, seguindo a lógica da distribuição do valor nos processos econômicos da produção. Nessa lógica, existem preços mais baixos para os recursos primários, em comparação aos mais altos preços de produtos de maior complexidade, mais trabalho

¹⁴ Ver Campbell; Cai (2007) e Ulgiati et. al (2011) para uma revisão mais profunda sobre aspectos teóricos que relacionam ambas as abordagens do valor. No presente trabalho, esses aspectos não são tratados em detalhe e não se consideram estritamente necessários para o desenvolvimento desta pesquisa.

acumulado e, portanto, maior contribuição ao valor agregado. Analogamente, a energia disponível agregada durante o ciclo de vida dos produtos, considerando-se também os esforços da biosfera, constitui a emergência total do sistema de produto. Em outras palavras, a emergência corresponde ao valor intrínseco de cada produto, baseado na medida do que foi requerido e agregado durante o ciclo de vida dos produtos.

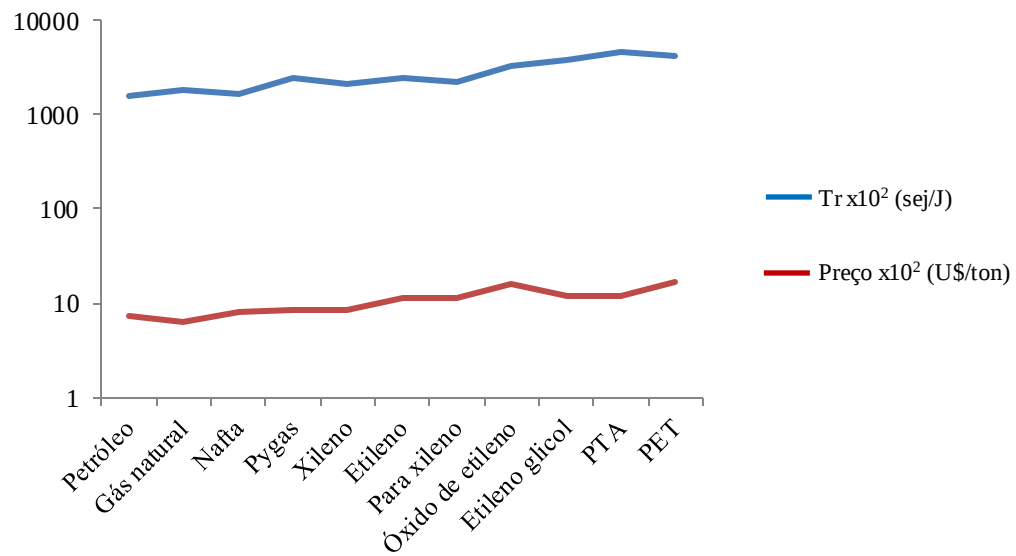


Figura 8- Evolução dos preços e as transformidades na cadeia de produção do PET

Embora os resultados da regressão linear entre as transformidades e o preço de mercado não derivem da dependência direta entre as variáveis, uma vez que as restrições termodinâmicas não influem diretamente nos fatores de determinação dos preços, existe uma correlação entre elas, onde o preço dos produtos apresenta uma relação proporcional à quantidade de emergência. Os estudos que tratam desse assunto referem-se a uma série de produtos e processos pertencentes a diversos setores da economia, que vão desde a exploração de recursos naturais até a produção de informação [ZUCHETTO; JANSEN (1985); ODUM et. al (1987); ODUM (2001); CAMPBELL; CAI (2007)]. Nesse sentido, Odum (2001) discute o assunto de forma mais abrangente, argumentando que entre mais ao frente da hierarquia universal da energia, maior fluxo de dinheiro é transacionado. Na Figura 9, o coeficiente de correlação entre o preço de mercado e a transformidade indica a porcentagem da variabilidade no preço explicada pela transformidade do produto. Essa relação apresenta um caráter mais coerente com a cadeia produtiva analisada, ao considerar as duas subcadeias do sistema. Nesse caso, a regressão linear do preço sobre a transformidade indica que 69% e 60% da

variabilidade total nos preços são explicadas pela transformidade dos produtos das subcadeias 1 e 2, respectivamente.

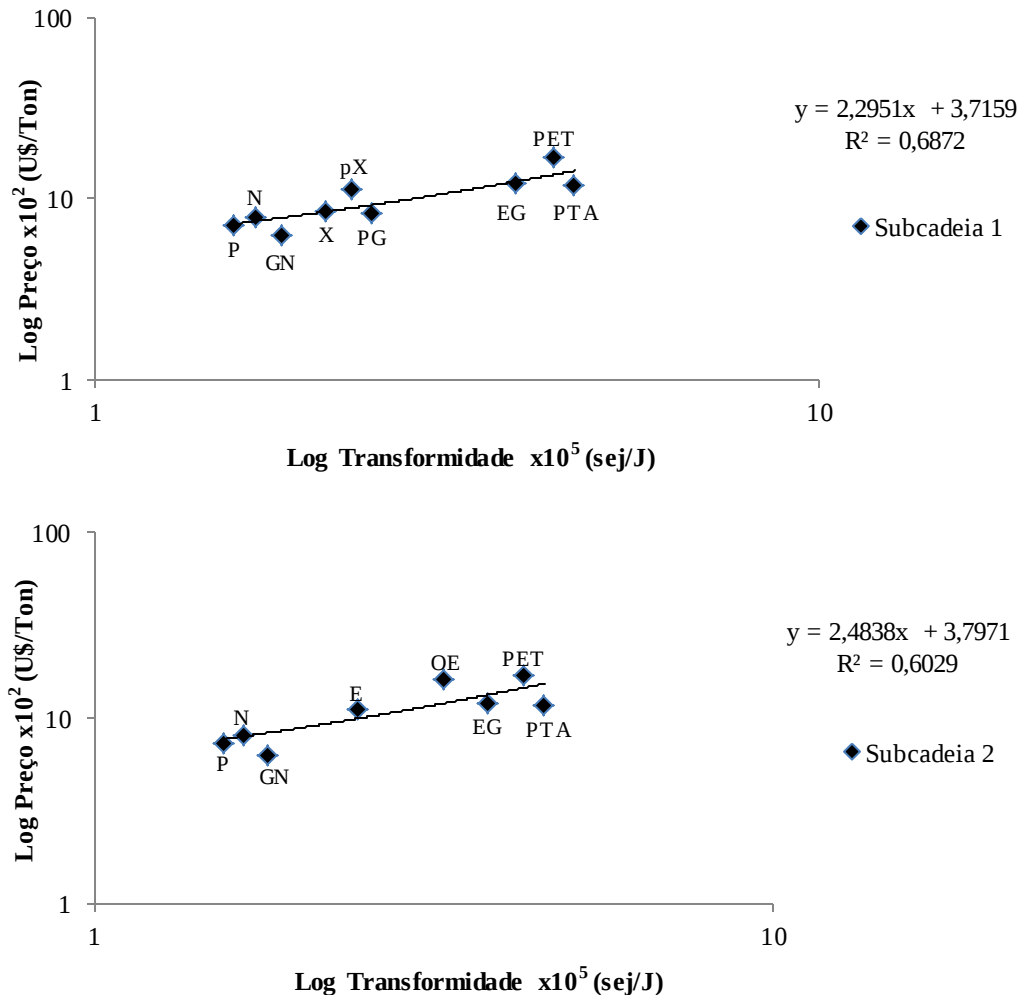


Figura 9- Regressão linear do preço sobre a transformidade dos produtos do sistema de PET: subcadeias 1e 2.
 *P: petróleo; GN: gás natural; N: nafta; X: xileno; E: etileno; PG: pygas; pX: para-xileno; OE: óxido de etileno;
 EG: etilenoglicol

A relação entre preço e transformidade descrita anteriormente na Figura 9 poderia ser observada de maneira mais contundente ao considerar uma ampla variedade de setores de produção econômica. No presente avaliação, os produtos em consideração relacionam-se somente aos setores de exploração, processamento e manufatura, ligados à indústria petroquímica. Uma análise mais abrangente, incluindo produtos e processos dessa indústria, poderia oferecer resultados mais compatíveis com o observado na literatura.

Diversas interpretações podem ser derivadas ao se relacionarem as abordagens de valoração em emergia e econômica, analisando os fatores determinantes do valor e a sua distribuição ao longo da cadeia de produção. A contribuição em emergia dos recursos fósseis,

representando acima dos 92% da energia dos produtos, não apresenta a mesma significância na determinação dos preços de mercado, isto é, na medida em que se avança na cadeia, outros aspectos, além do custo das matérias-primas, influem como determinantes dos preços dos produtos finais. Esses aspectos se atribuem às remunerações dos fatores de produção como base do valor econômico agregado, dentro dos quais se encontram elementos como os salários, as rendas, as amortizações, os benefícios, entre outros. Dessa maneira, a maior divergência percebida na distribuição do valor ao longo da cadeia de produção atribui-se a serviços humanos que, na avaliação em energia, como determinado anteriormente, não são considerados significativos.

4.5.1 Relação entre emdólares e preços de mercado

A Tabela 10 não representa uma comparação direta entre as abordagens de valoração em energia e econômica, mas um meio para destacar aspectos inerentes à relação entre ambas, fornecendo informações adicionais que facilitam uma visão mais integral do valor, mais além das restrições ou limitações interpostas pelo caráter de valor intrínseco do lado doador e de valor instrumental do lado usuário. Nessa tabela, listam-se os onze produtos avaliados, os correspondentes valores em energia, os quais, por meio da EMR, foram convertidos a equivalentes monetários (em\$, ou emdólar), e os valores econômicos desses produtos, derivados dos preços médios do mercado europeu do ano 2008.

Tabela 10 - Valores emdólar e preços de mercado

Produto	Energia / $\times 10^{12}$ (sej)	Emdólar* (em\$/kg)	Valor económico (\$/kg)	\$ como fração do Em\$
Petróleo	7,04	2,36	0,72	0,30
Gás natural	9,09	3,05	0,62	0,20
Nafta	7,85	2,63	0,79	0,30
Pygas	10,45	3,51	0,83	0,24
Xileno	9,16	3,07	0,85	0,28
Etileno	11,58	3,89	1,11	0,28
Para xileno	10,74	3,60	1,13	0,31
Óxido de etileno	9,93	3,33	1,61	0,48
Etileno glycol	7,43	2,50	1,20	0,48
PTA	9,02	3,03	1,17	0,39
PET	10,95	3,67	1,68	0,46

* Para o cálculo do valor emdólar, usou-se a EMR estimada para a região europeia de $2,98 \times 10^{12}$ sej/\$.

Em primeira instância, é de se notar que todos os valores em dólar dos produtos são maiores que os valores econômicos, o que poderia indicar que os preços de mercado refletem medidas de valor subestimadas e que nas transações comerciais não existe uma troca justa de energia por dinheiro. Por conseguinte, estimativas de valor mais adequadas considerariam a contribuição da natureza na produção desses produtos. Isto não significa que, necessariamente, pelo fato de considerar o trabalho da natureza e, portanto, sua contribuição no valor dos produtos, os preços de mercado deveriam aumentar. No entanto, conceder maior importância a esses aspectos, integrando-os ao processo de valoração, poderia justificar, em certa medida, uma maior atenção e redistribuição das rendas aos assuntos e estratégias para a proteção e preservação dos recursos da biosfera.

Assim como mostrado na Tabela 5 e na Figura 6, as estimativas em energia não apresentam uma tendência gradativamente ascendente, na medida em que se avança na cadeia de produção. Consequentemente, não se observa uma relação clara entre os valores em dólares e os preços, uma vez que os maiores valores em energia e, portanto em dólares (pygas, para-xileno, etileno e PET), não correspondem aos maiores preços de mercado para o ano 2008 (óxido de etileno, etilenoglicol, PTA e PET). Portanto, os preços de mercado apresentam uma sequência mais lógica dos produtos que conformam uma cadeia de produção, dado que tendem a ser maiores nos processos finais, devido ao efeito da distribuição do valor ao longo da cadeia.

Na Tabela 10, os primeiros seis produtos do sistema (conforme observado na Figura 2) exibem uma maior divergência na relação dólar-preço, o que poderia indicar que a sua produção se encontra, em parte, subsidiada com base no ganho acumulado de energia. Nos últimos cinco produtos, essa relação tende a ser mais convergente, portanto, poder-se-ia assumir que o mercado determinou preços mais coerentes com o investimento da biosfera na produção desses produtos.

Como visto em resultados anteriores, a maior contribuição na energia dos produtos provém dos insumos de petróleo e gás natural. De igual maneira, o valor em dólar encontra-se suportado, principalmente, nestes dois recursos. Nesse sentido, o grau de divergência entre as valorações se deve à troca de energia entre a natureza e a economia, onde esta última está se beneficiando grandemente em função de preços subvalorados, especialmente, das matérias-primas fósseis (CAMPBELL; BROWN, 2012). Esses resultados concordam com aqueles determinados por Campbell; Brown (2012), nas comparações entre dólar e preços do capital natural e os serviços dos ecossistemas das florestas estadunidenses. Baseados nos seus resultados, os autores propõem a seguinte hipótese: “onde existe funcionamento de mercado,

os valores em energia e monetários dos recursos se encontram mais proximamente alinhados e na mesma ordem de magnitude”. No entanto, contrariando essa avaliação, eles destacam a exceção dos minerais e combustíveis fósseis, cujos valores em dólar foram, aproximadamente, entre 30 e 60 vezes maiores que os valores monetários, respectivamente. Entretanto, os autores deixam claro que estes não são resultados universais.

5 CONCLUSÃO

Em publicações científicas atuais, a síntese em emergia tem sido escassamente aplicada aos processos de produção à jusante da extração e refino de combustíveis fósseis. Nesta pesquisa, analisam-se, sob a ótica da emergia, os processos da cadeia de produção do PET para embalagens tipo garrafa, compreendendo uma variedade de produtos intermediários.

Onze sistemas de produto foram analisados e as UEVs determinadas se compararam com as já existentes na literatura. Novas UEVs foram calculadas (gás da pirólise -PyGas-, xileno, para-xileno, óxido de etileno, etileno glicol e ácido tereftálico purificado -PTA). A avaliação centra-se nos aspectos tecnológicos do sistema de produção escolhido, permitindo contabilizar a contribuição da energia e os recursos na produção do PET e os seus precursores, além de fornecer dados úteis para o processo de tomada de decisões. Os resultados podem ser aplicados na tomada de decisão quanto a um determinado tipo de tecnologia, considerando o custo ambiental de cada fluxo de entrada para a produção. Por conseguinte, aspectos como a forte dependência dos processos anteriores sobre recursos de fontes não renováveis, contribuindo acima de 92 % da emergia total dos sistemas, poderiam ser associados às decisões estratégicas sobre alternativas de produção e medidas de uso eficiente dos recursos.

Os resultados mostram que o uso de bases de dados de inventários de ciclo de vida conduz a cálculos de UEVs confiáveis, de acordo com a comparação com os dados anteriores na literatura. Também, pode-se considerar a análise em emergia baseada em ICVs como uma maneira prática e viável para contabilizar a emergia dos sistemas de produção, além de oferecer importantes contribuições para a integração e/ou complementaridade de ambos os métodos: análise de ciclo de vida e emergia. Entretanto, ressalta-se que a utilização de ICVs para o cálculo da emergia confronta diversos desafios, portanto, deve ser realizada levando em conta aspectos sobre a coerência nas regras da álgebra da emergia e a estrutura dos dados no inventário e, adicionalmente, os limites de análise dos sistemas em consideração.

Assim sendo, este trabalho contribui para a consolidação das bases de dados em emergia e propõe um intervalo esperado para a indústria petroquímica, como uma abordagem que pode ser útil ao se aplicar o método em emergia e se facilitar a realização de futuras pesquisas relacionadas. Esse intervalo de valores em emergia propõe-se como uma aproximação metodológica para avaliações no setor petroquímico, que, como toda aproximação, deve ser usada com cuidado em pesquisas que demandem um nível de detalhe

mais rigoroso, onde a exatidão dos resultados represente um fator crítico no impacto da pesquisa.

Dados os resultados que se referem somente aos aspectos tecnológicos e que tecnologias desse tipo se encontram altamente globalizadas, as UEV podem ser utilizadas como medidas de eficiência em comparação com outros sistemas de produção similares, com tecnologias diferentes e, portanto, níveis de eficiência diferentes. Dessa maneira, os resultados poderiam ser utilizados para auxiliar na tomada de decisões estratégicas, em aspectos como intensidade no uso de recursos, diversificação e gestão dos fatores de produção, desempenho e impacto ambiental, entre outros, levando em consideração o custo ambiental dos insumos aos sistemas. A inclusão de mão de obra direta e indireta (mão de obra e serviços, respectivamente) permite quantificar a influência do mercado e contextualizar os resultados exclusivamente para a região analisada. Esse tipo de resultado pode ser aplicado para decisões sobre o mercado local, no qual um tipo dado de tecnologia pode ser implantado.

O cálculo dos serviços foi realizado com base nos fluxos elementares que constituem os sistemas de produto. Portanto, os preços de mercado considerados correspondem aos relacionados a esse tipo de insumos, ou seja, a recursos do setor primário, como matérias-primas. Assim, a contribuição estimada dos serviços humanos aos sistemas corresponde àquela requerida para a produção das matérias-primas necessárias ao ciclo de vida dos produtos. A contabilidade dos valores agregados, derivados dos processos de produtos transformados que, direta ou indiretamente influem na produção final, poderiam oferecer distintos resultados.

A comparação entre os valores em dólar e os preços de mercado expressam resultados de maneira mais receptiva para a sociedade, aumentando o nível de flexibilidade do estudo. Com base nesses resultados, não se pretende indicar que os preços devem aumentar ao se considerar o trabalho da natureza e, por conseguinte, a sua contribuição na valoração dos produtos, mas destacar e concretizar a sua importância no processo de valoração. O aumento dos preços, por essa causa, poderia intensificar a discussão sobre a distribuição da riqueza. Em última instância, a contextualização da contribuição da natureza na valoração pode ser considerada como fonte de informações que sustentam os esforços para manter, proteger e atribuir responsabilidades pelo uso intensivo dos recursos, facilitando, ainda, a aplicação de políticas públicas integradas à sustentabilidade dos setores produtivos.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Calcular os indicadores em energia para os produtos avaliados, levando em consideração as porcentagens de petróleo e gás natural importado para a Europa.
- Para um trabalho mais completo sobre avaliação de aspectos ambientais relacionados à indústria plástica e petroquímica, sugere-se complementar o trabalho com análises sobre impactos ambientais e consequências da produção desse tipo.
- Este trabalho poderia ser adaptado, usando-se inventários de ciclo de vida para o Brasil, uma vez que os setores petrolíferos e petroquímicos representam uma grande participação na produção nacional brasileira.

7 REFERÊNCIAS

- Almeida, C.M.V.B., Rodrigues, A.J.M., Bonilla, S.H., Giannetti, B.F. Emergy as a tool for ecodesign: evaluating materials selection for beverage packages in Brazil. *Journal of Cleaner Production*. 2010; 18: 32–43.
- Amienyo, D., Gujba, H., Stichnothe, H., Azapagic, A. Life cycle environmental impacts of carbonated soft drinks. *International Journal of Life cycle Assessment*. 2013; 18: 77-92.
- Bakshi, B. R. A Thermodynamic framework for ecologically conscious process systems engineering. *Computers and Chemical Engineering*. 2002; 26: 269–282.
- Banco Mundial. Bases de Dados de Indicadores Econômicos. Disponível em: <<http://www.data.worldbank.org>>. Acesso em: 30 de novembro de 2016.
- Bastianoni, S., Campbell, D., Susani, L., Tiezzi, E. The solar transformity of oil and petroleum natural gas. *Ecological Modelling*. 2005; 86: 212–220.
- Bastianoni, S., Campbell, D.E., Ridolfi, R., Pulselli, F.M. The solar transformity of petroleum fuels. *Ecological Modelling*. 2009; 220: 40–50.
- Boustead, I. Eco-profiles of the European plastics Industry- *crude oil*. Association of Plastics Manufacturers, PlasticsEurope. 2005.
- Boustead, I. Eco-profiles of the European plastics Industry- *naphtha*. Association of Plastics Manufacturers, PlasticsEurope. 2005.
- Boustead, I. Eco-profiles of the European plastics Industry- *natural gas*. Association of Plastics Manufacturers, PlasticsEurope. 2005.
- Brown, M. T., Herendeen, R. A. Embodied Energy Analysis and Emergy Analysis: a comparative view. *Ecological Economics*. 1996; 19(3): 219-235.
- Brown, M. T; McClanahan, T.R. Emergy analysis perspectives of Thailand and Mekong river dam proposals. Report to the Cousteau Society. Center for Wetlands and Water Resources, University of Florida; 1992. p. 66.
- Brown, M. T, Protano, G., Ulgiati, S. Assessing geobiosphere work of generating global reserves of coal, crude oil, and natural gas. *Ecological Modelling*. 2011; 222: 879–887.
- Brown, M. T.; Ulgiati, S. Emergy analysis and environmental accounting. In: *Encyclopedia of Energy*. Oxford: Elsevier, 2004. p. 329- 354.
- Brown, M. T.; Ulgiati, S. Understanding the global economic crisis: a biophysical perspective. *Ecological Modelling*. 2011; 223: 4-13.
- Campbell, D., Cai, T. Emergy and economic value. Em: *Proceedings of the Fourth Biennial Emergy Conference*; 2007; Gainesville, FL. Gainesville: The Center for Environmental Policy, Department of Environmental Engineering Sciences, University of Florida; 2007. p.24.

Campbell, E., Brown, M. T. Environmental accounting of natural capital and ecosystem services for the US National Forest System. *Environment, Development and Sustainability*. 2012; 14: 691-724.

Campbell, E., Tilley, D. The eco-price: how environmental emergy equates to currency. *Ecosystem Services*. 2014; 7: 128-140.

Cook, E. Man, Energy and Society. San Francisco: W.H. Freeman & Co Ltd; 1976. p.478.

CPME. Eco-profiles and environmental product declarations of the PET manufacturers in Europe- *purified terephthalic acid (PTA)*. Committee of PET Manufacturers in Europe, CPME. 2014.

Fahim, M., Alsahhaf, T., Elkilani, A. Fundamentals of petroleum refining. 1^a ed. Oxford: Elsevier; 2010. p.513.

Ingwersen, W. Emergy as a life cycle impact assessment indicator: a gold mining case study. *Journal of Industrial Ecology*. 2011; 15(4): 550-566.

International Organization for Standardization. ISO 14040-44. Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework. Geneva, Switzerland; 2006.

Madival, S., Auras, R., Singh, S.P., Narayan, R. Assessment of the environmental profile of PLA, PET and PS clamshell containers using LCA methodology. *Journal of Cleaner Production*. 2009; 17: 1183-1194.

National Environmental Accounting Database. Bases de Dados sobre a Emergia dos Países. Disponível em: <<http://www.cep.ees.ufl.edu/need/>>. Acesso em: 30 de novembro de 2016.

Odum, H.T. Environmental Accounting: Emergy and Environmental Decision Making. New York: John Wiley & Sons, 1996.

Odum, H.T. Handbook of emergy evaluation: a compendium of data for emergy computation issued in a series of folios. Folio #2- Emergy of Global Processes. Center for Environmental Policy, Environmental Engineering Sciences, University of Florida, Gainesville, FL; 2000.

Odum, H.T., Wang, F.C., Alexander Jr. J.F., Gilliland, M., Miller, M., Sendzimer, J. Energy Analysis of Environmental Value. Center for Wetlands, University of Florida; 1987. p. 96.

Odum, H.T. Self organization, transformity, and information. *Science*. 1988; 242: 1132- 1139.

Odum, H.T., Odum, E. C. Energy Analysis Overview of Nations, with sections by G. Bosh, L. Braat, W. Dunn, G.de R. Innes, J.R. Richardson, D. M. Scienceman, J. P. Sendzimir, D. J. Smith and M.V. Thomas. Working paper. International Institute of Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria; 1983. P. 469.

Person, L., Ekvall, T., Weidema, B. P. Life cycle assessment of packaging systems for beer and soft drinks. Technical report 6: disposable PET bottles. Ministry of Environment and Energy, Denmark, Danish Environmental Protection Agency, Miljøprojekt. 1998; 405. p. 198.

Pillet, G., Odum, H. T. Energy externality and the economy of Switzerland. *Schweiz Zeitschrift für Volkswirtschaft und Statistik*. 1984; 120(3): 409- 435.

PlasticsEurope. Eco-profiles and environmental product declarations of the European plastics manufacturers- *benzene, toluene and xylene (aromatics, BTX)*. Association of Plastics Manufacturers, PlasticsEurope. 2013.

PlasticsEurope. Eco-profiles and environmental product declarations of the European plastics manufacturers- *ethylene, propylene, butadiene, pyrolysis gasoline, ethylene oxide (EO), ethylene glycols (MEG, DEG, TEG)*. Association of Plastics Manufacturers, PlasticsEurope. 2012.

PlasticsEurope. Eco-profiles and environmental product declarations of the European plastics manufacturers- *polyethylene terephthalate (PET) (bottle grade)*. Association of Plastics Manufacturers, PlasticsEurope. 2011.

PlasticsEurope. Eco-profiles and environmental product declarations. Association of Plastics Manufacturers, PlasticsEurope. 2011.

PlasticsEurope. Plásticos - os fatos: Uma análise dos dados da produção europeia de plásticos, da demanda e dos resíduos. Disponível em: <www.plasticseurope.org>. Acesso em: 17 de abril de 2015.

Raugei, M., Bargigli, M., Ulgiati, S. Nested emergy analyses: moving ahead from the spreadsheet platform. Em: *Proceedings of the Fourth Biennial Emergy Conference*; 2007; Gainesville, FL. Gainesville: The Center for Environmental Policy. Department of Environmental Engineering Sciences. University of Florida; 2007.

Raugei, M., Rugani, B., Benetto, E., Ingwersen, W. Integrating emergy into LCA: potential added value and lingering obstacles. *Ecological Modelling*. 2014; 271: 4– 9.

Rugani, B., Benetto, E. Improvements to emergy evaluations by using life cycle assessment. *Environmental Science and Technology*. 2012; 46 (9): 4701–4712.

Sha S., Melin, K., Villalba de Kokkonen, D., Hurme, M. Solar energy footprint of ethylene processes. *Ecological Engineering*. 2015; 82: 15–25.

Shen, L., Worrell, E., Patel, M.K. Open-loop recycling: a LCA case study of PET bottle-to-fibre recycling. *Resources, Conservation and recycling*. 2010; 55(1): 34-52.

Slesser, M. *Energy in the economy*. New York: St. Martin's Press; 1978. p.162.

Ukidwe N. U, Bakshi B. R. Thermodynamic accounting of ecosystem contribution to economic sectors with application to 1992 US economy. *Environmental Science and Technology*. 2004; 38 (18): 4810–27.

Ukidwe, N. U, Bakshi, B. R. Industrial and ecological cumulative exergy consumption of the United States via the 1997 input–output benchmark model. *Energy*. 2007; 32: 1560-1592.

Ulgiati, S., Brown, M. Labor and services as information carriers in emergy-LCA accounting. *Journal of Environmental Accounting and Management*. 2014; 2: 160-167.

Ulgiati, S., Odum, H. T., Bastianoni, S. Emergy use, environmental loading and sustainability. An emergy analysis of Italy. *Ecological Modelling*. 1994; 73: 215- 268.

Ulgiati, S., Zucaro, A., Franzese, P. P. Shared wealth or nobody's land? The worth of naturalcapital and ecosystem services. *Ecological Economics*. 2011; 70: 778-787.

Anexo A- TABELA DE UEVs DE REFERÊNCIA PARA ESTE TRABALHO

	Insumo	Unidad e	UEV (sej/unidade)	Referência
1	Água de processo-origem não especificada	J	6,89E+04	Odum, 1996
2	Água resfriamento-origem não especificada	G	2,70E+05	Bastianoni et al., 2001
3	Água-Lago	G	4,52E+05	Buenfil, 2001
4	Água-Mar	J	5,36E+04	Buenfil, 2001
5	Água-Poço natural	J	6,89E+04	Odum, 1996
6	Água-Rio	G	3,41E+05	Buenfil, 2001
7	Alumínio	G	5,40E+09	Cohen et al., 2007
8	Anidrita	G	1,68E+09	Odum, 1996
9	Areia	G	1,68E+09	Odum, 1996
10	Argila	G	4,80E+09	Odum, 1996
11	Barita	G	1,68E+09	Odum, 1996
12	Basalto	G	7,56E+09	Ulgiati et al., 1994
13	Bórax	G	1,68E+09	Odum, 1996
14	Brometo de sódio	G	1,68E+09	Odum, 1996
15	Cádmio	G	3,40E+13	Cohen et al., 2007
16	Calcita	g	1,68E+09	Odum, 1996
17	Carbônio, em matéria orgânica, no solo	g	2,77E+09	Haukoos, 1995
18	Carvão	J	1,32E+05	Brown et al., 2011
19	Cascalho	g	8,40E+08	Odum, 1996
20	Caulinita	g	1,68E+09	Odum, 1996
21	Cério	g	1,14E+10	Cohen et al., 2007
22	Chumbo	g	4,80E+11	Cohen et al., 2007
23	Cinábrio	g	1,68E+09	Odum, 1996
24	Cloreto de sódio	g	1,68E+09	Odum, 1996
25	Cobalto	g	1,30E+11	Cohen et al., 2007
26	Cobre	g	9,80E+10	Cohen et al., 2007
27	Colemanita	g	1,68E+09	Odum, 1996
28	Crisotila	g	1,68E+09	Odum, 1996
29	Cromo	g	1,50E+11	Cohen et al., 2007
30	Diatomita	g	1,68E+09	Odum, 1996
31	Dióxido de carbon	g	8,87E+07	Buenfil, 2001
32	Dioxido de titânio	g	3,82E+10	Cohen et al., 2007
33	Dolomita	g	1,85E+10	Campbell e Ohrt, 2009
34	Energia cinética do vento	J	9,90E+04	Brown e Ulgiati, 2002
35	Energia em biomassa	J	6,75E+04	Odum, 1996
36	Energia geopotencial da água	J	1,35E+05	Odum, 1996
37	Energia geotermica	J	4,52E+05	Odum, 1996
38	Energia solar	J	7,93E+04	Brown et al., 2012
39	Enxofre	g	2,08E+10	Campbell et al., 2014
40	Estanho	g	1,70E+12	Cohen et al., 2007
41	Estibina	g	1,68E+09	Odum, 1996

42	Európio	g	1,68E+09	Odum, 1996
43	Feldspato	g	1,68E+09	Odum, 1996
44	Ferro	g	1,20E+10	Cohen et al., 2007
45	Flúor	g	1,68E+09	Odum, 1996
46	Fluorita	g	8,38E+08	Odum, 1996
47	Fósforo	g	2,07E+10	Odum, 1996
48	Gadolínio	g	1,68E+09	Odum, 1996
49	Gás natural	J	1,78E+05	Brown et al., 2011
50	Gesso	g	2,85E+09	Brandt-Williams e Pillet, 2003
51	Granito	g	8,40E+08	Odum, 1996
52	Índio	g	4,03E+11	Cohen et al., 2007
53	Kieserita	g	1,68E+09	Odum, 1996
54	Lantânio	g	1,68E+09	Odum, 1996
55	Lignita	J	1,11E+05	Brown et al., 2011
56	Lítio	g	9,27E+11	Cohen et al., 2007
57	Madeira	J	1,04E+04	Odum, 1996
58	Magnésio	g	1,68E+09	Odum, 1996
59	Magnesita	g	1,68E+09	Odum, 1996
60	Manganês	g	3,50E+11	Cohen et al., 2007
61	Mão de obra	J	1,24E+07	Ulgianti et al., 1994
62	Mercurio	g	4,20E+13	Cohen et al., 2007
63	Molibdênio	g	7,00E+11	Cohen et al., 2007
64	Neodímio	g	1,68E+09	Odum, 1996
65	Níquel	g	2,00E+11	Cohen et al., 2007
66	Nitrato de sódio	g	1,68E+09	Odum, 1996
67	Olivina	g	1,68E+09	Odum, 1996
68	Ouro	g	5,00E+11	Cohen et al., 2007
69	Paládio	g	1,20E+11	Cohen et al., 2007
70	Petróleo	J	1,56E+05	Brown et al., 2011
71	Platina	g	3,70E+11	Cohen et al., 2007
72	Praseodímio	g	1,68E+09	Odum, 1996
73	Prata	g	4,50E+11	Cohen et al., 2007
74	Rênio	g	8,93E+12	Cohen et al., 2007
75	rocha metamórfica, grafita	g	1,68E+09	Odum, 1996
76	Ródio	g	1,20E+12	Cohen et al., 2007
77	Samário	g	1,68E+09	Odum, 1996
78	Silvinita	g	1,68E+09	Odum, 1996
79	Sulfato de sódio	g	1,40E+09	Campbell et al., 2014
80	Talco	g	2,80E+10	Campbell et al., 2014
81	Tântalo	g	1,70E+11	Cohen et al., 2007
82	Telúrio	g	5,04E+13	Cohen et al., 2007
83	Turfa	J	3,19E+04	Odum, 1996
84	Ulexita	g	1,68E+09	Odum, 1996
85	Urânio	g	1,60E+11	Cohen et al., 2007
86	Xisto	g	1,68E+09	Odum, 1996
87	Zinco	g	7,20E+10	Cohen et al., 2007

88	Zircónio	g	3,18E+10	Cohen et al., 2007
----	----------	---	----------	--------------------

**Anexo B – TABELAS DE CONTABILIDADE EM EMERGIA DO SISTEMA DE
PRODUÇÃO DE PET PARA GARRAFAS**

Tabela B.1. Contabilidade em energia para a produção de 1 kg de petróleo

	Insumo	Quantidade	Unidade	Classe	UEV (sej/unidade)	Energia (sej)	% de energia por insumo
1	Água-abastecimento público	3,29E-01	J	R	6,89E+04	2,27E+04	< 0,1
2	Água-Mar	8,39E-02	J	R	5,36E+04	4,50E+03	< 0,1
3	Água-origem não especificada	6,55E+01	J	R	6,89E+04	4,51E+06	< 0,1
4	Água-Poço natural	8,65E-05	J	R	6,89E+04	5,96E+00	< 0,1
5	Água-Rio	2,12E-07	G	R	3,41E+05	7,22E-02	< 0,1
6	Ar	3,70E-07	G	R	8,67E+07	3,21E+01	< 0,1
7	Energia das marés	8,71E+00	J	R	2,83E+04	2,46E+05	< 0,1
8	Energia em biomassa	1,67E+04	J	R	6,75E+04	1,13E+09	< 0,1
9	Energia geopotencial da água	5,80E+03	J	R	1,35E+05	7,82E+08	< 0,1
10	Energia geotermica	2,54E+00	J	R	4,52E+05	1,15E+06	< 0,1
11	Energia cinética do vento	7,87E+02	J	R	9,90E+04	7,78E+07	< 0,1
12	Energia solar	9,50E-03	J	R	1,00E+00	9,50E-03	< 0,1
13	Hidrogênio	2,77E-02	J	R	1,15E+05	3,19E+03	< 0,1
14	Madeira	1,47E-03	J	R	1,04E+04	1,53E+01	< 0,1
15	Nitrogênio	3,39E-04	G	R	1,17E+10	3,96E+06	< 0,1
16	Oxigênio	8,07E-05	G	R	8,67E+07	7,00E+03	< 0,1
17	Areia	8,28E-08	G	N	1,68E+09	1,39E+02	< 0,1
18	Argila	4,43E-09	G	N	4,80E+09	2,13E+01	< 0,1
19	Baritas	2,63E-06	G	N	1,68E+09	4,42E+03	< 0,1
20	Bauxita	1,81E-05	G	N	1,44E+09	2,60E+04	< 0,1
21	Bentonita	3,31E-06	G	N	4,80E+09	1,59E+04	< 0,1
22	Calcário	9,20E-04	G	N	1,68E+09	1,55E+06	< 0,1
23	Carvão	3,21E+05	J	N	1,32E+05	4,23E+10	0,6
24	Cascalho	1,62E-05	G	N	8,40E+08	1,36E+04	< 0,1
25	Chumbo	3,38E-05	G	N	4,80E+11	1,62E+07	< 0,1
26	Cloreto de potássio	1,37E-07	G	N	4,97E+09	6,81E+02	< 0,1
27	Cloreto de sódio	8,84E-05	G	N	1,68E+09	1,49E+05	< 0,1
28	Cobre	1,85E-09	G	N	9,80E+10	1,81E+02	< 0,1
29	Cromo	6,85E-11	G	N	1,50E+11	1,03E+01	< 0,1
30	Dolomita	5,38E-05	G	N	1,85E+10	9,95E+05	< 0,1
31	Enxofre	3,42E-05	G	N	2,08E+10	7,11E+05	< 0,1
32	Feldspato	9,32E-37	G	N	1,68E+09	1,57E-27	< 0,1
33	Ferro	4,40E-03	G	N	1,20E+10	5,28E+07	< 0,1
34	Ferro-manganês	4,00E-06	G	N	3,50E+11	1,40E+06	< 0,1
35	Fluorita	3,27E-07	G	N	8,36E+08	2,73E+02	< 0,1
36	Fosfato	8,38E-12	G	N	2,99E+10	2,50E-01	< 0,1
37	Gás natural	1,51E+06	J	N	1,70E+05	2,56E+11	3,7
38	Giz (CaCO3)	4,93E-32	G	N	1,13E+07	5,54E-25	< 0,1

39	Granito	3,02E-13	G	N	8,40E+08	2,54E-04	< 0,1
40	Lignita	2,76E-02	J	N	1,11E+05	3,07E+03	< 0,1
41	Mercurio	4,25E-11	G	N	4,20E+13	1,78E+03	< 0,1
42	Níquel	2,95E-14	G	N	2,00E+11	5,90E-03	< 0,1
43	Olivina	4,13E-05	G	N	1,68E+09	6,94E+04	< 0,1
44	Petróleo	4,53E+07	J	N	1,48E+05	6,70E+12	95,7
45	Rutilo	7,08E-32	G	N	1,68E+09	1,19E-22	< 0,1
46	Sulfato de cálcio (CaSO ₄)	2,46E-08	G	N	1,68E+09	4,13E+01	< 0,1
47	Talco	5,89E-26	G	N	2,80E+10	1,65E-15	< 0,1
48	Turfa	1,31E-01	J	N	3,19E+04	4,18E+03	< 0,1
49	Uranio	3,98E-04	G	N	1,60E+11	6,37E+07	< 0,1
50	Xisto	6,95E-08	G	N	1,68E+09	1,17E+02	< 0,1
51	Zinco	1,24E-06	G	N	7,20E+10	8,90E+04	< 0,1
52	Petróleo (PRODUTO)				7,00E+09	7,00E+12	100,0

Tabela B.2. Contabilidade em energia para a produção de 1 kg de gás natural

	Insumo	Quantidade	Unidade	Classe	UEV (sej/unidade)	Energia (sej)	% de energia por insumo
1	Água-abastecimento público	7,35E-01	J	R	6,89E+04	5,06E+04	< 0,1
2	Água-Mar	1,87E-01	J	R	5,36E+04	1,00E+04	< 0,1
3	Água-origem não especificada	1,46E+02	J	R	6,89E+04	1,00E+07	< 0,1
4	Água-Poço natural	1,93E-04	J	R	6,89E+04	1,33E+01	< 0,1
5	Água-Rio	4,73E-04	G	R	3,41E+05	1,61E+02	< 0,1
6	Ar	8,27E-04	G	R	8,67E+07	7,17E+04	< 0,1
7	Energia das marés	2,58E+01	J	R	2,83E+04	7,30E+05	< 0,1
8	Energia em biomassa	4,96E+04	J	R	6,75E+04	3,35E+09	< 0,1
9	Energia geopotencial da água	1,71E+04	J	R	1,35E+05	2,30E+09	< 0,1
10	Energia geotermica	6,67E+00	J	R	4,52E+05	3,01E+06	< 0,1
11	Energia cinética do vento	2,33E+03	J	R	9,90E+04	2,31E+08	< 0,1
12	Energia solar	2,61E-02	J	R	1,00E+00	2,61E-02	< 0,1
13	Hidrogênio	6,19E-02	J	R	1,15E+05	7,12E+03	< 0,1
14	Madeira	3,28E-03	J	R	1,04E+04	3,41E+01	< 0,1
15	Nitrogênio	7,58E-04	G	R	1,17E+10	8,84E+06	< 0,1
16	Oxigênio	1,80E-04	G	R	8,67E+07	1,56E+04	< 0,1
17	Areia	1,85E-07	G	N	1,68E+09	3,11E+02	< 0,1
18	Argila	9,89E-09	G	N	4,80E+09	4,75E+01	< 0,1
19	Barita	5,87E-06	G	N	1,68E+09	9,87E+03	< 0,1
20	Bauxita	4,04E-05	G	N	1,44E+09	5,81E+04	< 0,1
21	Bentonita	7,39E-06	G	N	4,80E+09	3,55E+04	< 0,1
22	Calcário	2,06E-03	G	N	1,68E+09	3,45E+06	< 0,1

23	Carvão	9,35E+05	J	N	1,32E+05	1,23E+11	1,4
24	Cascalho	3,63E-05	G	N	8,40E+08	3,05E+04	< 0,1
25	Chumbo	7,56E-05	G	N	4,80E+11	3,63E+07	< 0,1
26	Cloreto de potássio	3,06E-07	G	N	4,97E+09	1,52E+03	< 0,1
27	Cloreto de sódio	1,97E-04	G	N	1,68E+09	3,32E+05	< 0,1
28	Cobre	4,13E-09	G	N	9,80E+10	4,05E+02	< 0,1
29	Cromo	1,53E-10	G	N	1,50E+11	2,29E+01	< 0,1
30	Dolomita	1,20E-04	G	N	1,85E+10	2,22E+06	< 0,1
31	Enxofre	7,64E-05	G	N	2,08E+10	1,59E+06	< 0,1
32	Feldspato	2,08E-36	G	N	1,68E+09	3,50E-27	< 0,1
33	Ferro	9,83E-03	G	N	1,20E+10	1,18E+08	< 0,1
34	Ferro-manganês	8,93E-06	G	N	3,50E+11	3,13E+06	< 0,1
35	Fluorita	7,30E-07	G	N	8,36E+08	6,10E+02	< 0,1
36	Fosfato	1,87E-11	G	N	2,99E+10	5,59E-01	< 0,1
37	Gás natural	5,23E+07	J	N	1,70E+05	8,89E+12	98,1
38	Giz (CaCO ₃)	1,10E-31	G	N	1,13E+07	1,24E-24	< 0,1
39	Granito	6,75E-13	G	N	8,40E+08	5,67E-04	< 0,1
40	Lignita	6,17E-02	J	N	1,11E+05	6,85E+03	< 0,1
41	Mercurio	9,48E-11	G	N	4,20E+13	3,98E+03	< 0,1
42	Níquel	6,59E-14	G	N	2,00E+11	1,32E-02	< 0,1
43	Olivina	9,22E-05	G	N	1,68E+09	1,55E+05	< 0,1
44	Petróleo	2,76E+05	J	N	1,48E+05	4,09E+10	0,5
45	Rutilo	1,58E-31	G	N	1,68E+09	2,66E-22	< 0,1
46	Sulfato de cálcio (CaSO ₄)	5,48E-08	G	N	1,68E+09	9,21E+01	< 0,1
47	Talco	4,52E-26	G	N	2,80E+10	1,26E-15	< 0,1
48	Turfa	1,17E-01	J	N	3,19E+04	3,74E+03	< 0,1
49	Uranio	1,18E-03	G	N	1,60E+11	1,89E+08	< 0,1
50	Xisto	1,55E-07	G	N	1,68E+09	2,61E+02	< 0,1
51	Zinco	2,76E-06	G	N	7,20E+10	1,99E+05	< 0,1
52	Gás natural (PRODUTO)				9,06E+09	9,06E+12	100,0

Tabela B.3. Contabilidade em energia para a produção de 1 kg de nafta

	Insumo	Quantidade	Unidade	Classificação	UEV (sej/unidade)	Energia (sej)	% de energia por insumo
1	Água-abastecimento público	7,69E-01	J	R	6,89E+04	5,29E+04	< 0,1
2	Água-Mar	1,96E-01	J	R	5,36E+04	1,05E+04	< 0,1
3	Água-origem não especificada	2,58E+02	J	R	6,89E+04	1,77E+07	< 0,1
4	Água-Poço natural	2,02E-04	J	R	6,89E+04	1,39E+01	< 0,1
5	Água-Rio	4,94E-04	g	R	3,41E+05	1,69E+02	< 0,1

6	Ar	8,64E-04	g	R	8,67E+07	7,49E+04	< 0,1
7	Energia das marés	9,07E+00	J	R	2,83E+04	2,57E+05	< 0,1
8	Energia em biomassa	1,77E+04	J	R	6,75E+04	1,20E+09	< 0,1
9	Energia geopotencial da água	7,16E+03	J	R	1,35E+05	9,65E+08	< 0,1
10	Energia geotermica	2,07E+02	J	R	4,52E+05	9,36E+07	< 0,1
11	Energia cinética do vento	8,28E+02	J	R	9,90E+04	8,19E+07	< 0,1
12	Energia solar	8,07E-01	J	R	1,00E+00	8,07E-01	< 0,1
13	Hidrogênio	6,47E-02	J	R	1,15E+05	7,44E+03	< 0,1
14	Madeira	3,43E-03	J	R	1,04E+04	3,57E+01	< 0,1
15	Nitrogênio	7,92E-04	g	R	1,17E+10	9,24E+06	< 0,1
16	Oxigênio	1,88E-04	g	R	8,67E+07	1,63E+04	< 0,1
17	Areia	1,93E-07	g	N	1,68E+09	3,25E+02	< 0,1
18	Argila	1,03E-08	g	N	4,80E+09	4,97E+01	< 0,1
19	Barita	6,14E-06	g	N	1,68E+09	1,03E+04	< 0,1
20	Bauxita	4,23E-05	g	N	1,44E+09	6,07E+04	< 0,1
21	Bentonita	7,73E-06	g	N	4,80E+09	3,71E+04	< 0,1
22	Calcário	2,15E-03	g	N	1,68E+09	3,61E+06	< 0,1
23	Carvão	3,57E+05	J	N	1,32E+05	4,71E+10	0,6
24	Cascalho	3,79E-05	g	N	8,40E+08	3,19E+04	< 0,1
25	Chumbo	7,90E-05	g	N	4,80E+11	3,79E+07	< 0,1
26	Cloreto de potássio	3,20E-07	g	N	4,97E+09	1,59E+03	< 0,1
27	Cloreto de sódio	2,06E-04	g	N	1,68E+09	3,47E+05	< 0,1
28	Cobre	4,32E-09	g	N	9,80E+10	4,23E+02	< 0,1
29	Cromo	1,60E-10	g	N	1,50E+11	2,40E+01	< 0,1
30	Dolomita	1,26E-04	g	N	1,85E+10	2,32E+06	< 0,1
31	Enxofre	7,82E-05	g	N	2,08E+10	1,63E+06	< 0,1
32	Feldspato	2,18E-36	g	N	1,68E+09	3,66E-27	< 0,1
33	Ferro	1,03E-02	g	N	1,20E+10	1,23E+08	< 0,1
34	Ferro-manganês	9,34E-06	g	N	3,50E+11	3,27E+06	< 0,1
35	Fluorita	7,63E-07	g	N	8,36E+08	6,38E+02	< 0,1
36	Fosfato	1,96E-11	g	N	2,99E+10	5,84E-01	< 0,1
37	Gás natural	1,62E+06	J	N	1,78E+05	2,89E+11	3,7
38	Giz (CaCO3)	1,15E-31	g	N	1,13E+07	1,29E-24	< 0,1
39	Granito	7,05E-13	g	N	8,40E+08	5,93E-04	< 0,1
40	Lignita	6,45E-02	J	N	1,11E+05	7,16E+03	< 0,1
41	Mercurio	9,91E-11	g	N	4,20E+13	4,16E+03	< 0,1
42	Níquel	6,89E-14	g	N	2,00E+11	1,38E-02	< 0,1
43	Olivina	9,64E-05	g	N	1,68E+09	1,62E+05	< 0,1
44	Petróleo	4,80E+07	J	N	1,56E+05	7,50E+12	95,7
45	Rutilo	1,65E-31	g	N	1,68E+09	2,78E-22	< 0,1
46	Sulfato de cálcio (CaSO4)	5,73E-08	g	N	1,68E+09	9,63E+01	< 0,1
47	Talco	6,41E-26	g	N	2,80E+10	1,79E-15	< 0,1
48	Turfa	2,55E-01	J	N	3,19E+04	8,15E+03	< 0,1
49	Uranio	4,21E-04	g	N	1,60E+11	6,73E+07	< 0,1
50	Xisto	1,62E-07	g	N	1,68E+09	2,73E+02	< 0,1
51	Zinco	2,88E-06	g	N	7,20E+10	2,08E+05	< 0,1

52	Nafta (PRODUTO)	7,83E+09	7,83E+12	100,0
----	-----------------	----------	----------	-------

Tabela B.4. Contabilidade em energia para a produção de 1 kg de pygas

	Insumo	Quantidade	Unidade	Classificação	UEV (sej/unidade)	Energia (sej)	% de energia por insumo
1	Água de processo-origem não especificada	1,18E+4	J	R	6,89E+04	8,14E+8	< 0,1
2	Água resfriamento-origem não especificada	9,60E+3	g	R	2,70E+05	2,60E+9	< 0,1
3	Água-Lago	7,77E-1	g	R	4,52E+05	3,51E+5	< 0,1
4	Água-Mar	5,84E+3	J	R	5,36E+04	3,13E+8	< 0,1
5	Água-Poço natural	4,76E+2	J	R	6,89E+04	3,28E+7	< 0,1
6	Água-Rio	2,58E+2	g	R	3,41E+05	8,78E+7	< 0,1
7	Energia em biomassa	8,05E+4	J	R	6,75E+04	5,44E+9	0,1
8	Energia geopotencial da água	9,83E+4	J	R	1,35E+05	1,32E+10	0,1
9	Energia geotermica	4,41E+2	J	R	4,52E+05	1,99E+8	< 0,1
10	Energia cinética do vento	2,53E+4	J	R	9,90E+04	2,51E+9	< 0,1
11	Energia solar	2,20E+3	J	R	1,00E+00	2,20E+3	< 0,1
12	Madeira	8,79E+3	J	R	1,04E+04	9,14E+7	< 0,1
13	Alumínio	1,43E-2	g	N	5,40E+09	7,70E+7	< 0,1
14	Anidrita	7,27E-7	g	N	1,68E+09	1,22E+3	< 0,1
15	Areia	1,39E-5	g	N	1,68E+09	2,34E+4	< 0,1
16	Argila	5,59E-3	g	N	4,80E+09	2,68E+7	< 0,1
17	Barita	1,13E-3	g	N	1,68E+09	1,89E+6	< 0,1
18	Basalto	1,70E-8	g	N	7,56E+09	1,29E+2	< 0,1
19	Bórax	1,45E-7	g	N	1,68E+09	2,43E+2	< 0,1
20	Cádmio	7,03E-10	g	N	3,40E+13	2,39E+4	< 0,1
21	Calcita	1,32E+0	g	N	1,68E+09	2,22E+9	< 0,1
22	Carbono, no solo	8,86E-6	g	N	2,77E+09	2,45E+4	< 0,1
23	Carvão	3,40E+5	J	N	1,32E+05	4,49E+10	0,4
24	Cascalho	5,88E-2	g	N	8,40E+08	4,94E+7	< 0,1
25	Caulinita	3,30E-3	g	N	1,68E+09	5,54E+6	< 0,1
26	Cério	1,46E-4	g	N	1,14E+10	1,66E+6	< 0,1
27	Chumbo	2,30E-8	g	N	4,80E+11	1,10E+4	< 0,1
28	Cinábrio	1,15E-6	g	N	1,68E+09	1,93E+3	< 0,1
29	Cloreto de sódio	5,96E-1	g	N	1,68E+09	1,00E+9	< 0,1
30	Cobalto	3,06E-4	g	N	1,30E+11	3,98E+7	< 0,1
31	Cobre	6,10E-5	g	N	9,80E+10	5,98E+6	< 0,1
32	Colemanita	4,14E-6	g	N	1,68E+09	6,96E+3	< 0,1
33	Crisotila	1,23E-5	g	N	1,68E+09	2,07E+4	< 0,1
34	Cromo	2,14E-4	g	N	1,50E+11	3,21E+7	< 0,1
35	Diatomita	1,83E-10	g	N	1,68E+09	3,07E-1	< 0,1

36	Dióxido de carbono	2,14E+1	g	N	8,87E+07	1,90E+9	< 0,1
37	Dióxido de titânio	1,07E-2	g	N	3,82E+10	4,10E+8	< 0,1
38	Dolomita	8,61E-6	g	N	1,85E+10	1,59E+5	< 0,1
39	Enxofre	4,28E-3	g	N	2,08E+10	8,92E+7	< 0,1
40	Estanho	2,57E-7	g	N	1,70E+12	4,37E+5	< 0,1
41	Estibina	1,90E-11	g	N	1,68E+09	3,19E-2	< 0,1
42	Európio	3,65E-7	g	N	1,68E+09	6,13E+2	< 0,1
43	Feldspato	1,78E-12	g	N	1,68E+09	2,99E-3	< 0,1
44	Ferro	3,75E-3	g	N	1,20E+10	4,49E+7	< 0,1
45	Flúor	9,40E-4	g	N	1,68E+09	1,58E+6	< 0,1
46	Fluorita	1,93E-2	g	N	8,38E+08	1,62E+7	< 0,1
47	Fósforo	3,76E-3	g	N	2,07E+10	7,77E+7	< 0,1
48	Gadolínio	9,11E-7	g	N	1,68E+09	1,53E+3	< 0,1
49	Gás natural	1,11E+7	J	N	1,78E+05	1,98E+12	19,2
50	Gesso	2,37E-5	g	N	2,85E+09	6,75E+4	< 0,1
51	Granito	1,53E-12	g	N	8,40E+08	1,29E-3	< 0,1
52	Índio	1,03E-11	g	N	4,03E+11	4,16E+0	< 0,1
53	Kieserita	1,16E-7	g	N	1,68E+09	1,94E+2	< 0,1
54	Lantânio	4,37E-5	g	N	1,68E+09	7,33E+4	< 0,1
55	Lignita	2,90E+5	J	N	1,11E+05	3,22E+10	0,3
56	Lítio	2,66E-11	g	N	9,27E+11	2,47E+1	< 0,1
57	Magnésio	3,37E-15	g	N	1,68E+09	5,67E-6	< 0,1
58	Magnesita	1,09E-5	g	N	1,68E+09	1,83E+4	< 0,1
59	Manganês	1,02E-6	g	N	3,50E+11	3,58E+5	< 0,1
60	Molibdênio	6,01E-4	g	N	7,00E+11	4,21E+8	< 0,1
61	Neodímio	2,40E-5	g	N	1,68E+09	4,03E+4	< 0,1
62	Níquel	7,94E-4	g	N	2,00E+11	1,59E+8	< 0,1
63	Nitrato de sódio	7,71E-12	g	N	1,68E+09	1,29E-2	< 0,1
64	Olivina	2,49E-7	g	N	1,68E+09	4,18E+2	< 0,1
65	Ouro	2,17E-14	g	N	5,00E+11	1,08E-2	< 0,1
66	Paládio	1,27E-7	g	N	1,20E+11	1,53E+4	< 0,1
67	Petróleo	5,25E+7	J	N	1,56E+05	8,19E+12	79,7
68	Platina	3,94E-9	g	N	3,70E+11	1,46E+3	< 0,1
69	Praseodímio	2,55E-6	g	N	1,68E+09	4,28E+3	< 0,1
70	Prata	5,88E-14	g	N	4,50E+11	2,65E-2	< 0,1
71	Rênio	1,05E-9	g	N	8,93E+12	9,40E+3	< 0,1
72	rocha metamórfica, grafita	2,70E-5	g	N	1,68E+09	4,52E+4	< 0,1
73	Ródio	3,53E-9	g	N	1,20E+12	4,24E+3	< 0,1
74	Samário	1,82E-6	g	N	1,68E+09	3,05E+3	< 0,1
75	Silvinita	7,20E-6	g	N	1,68E+09	1,21E+4	< 0,1
76	Sulfato de sódio	5,48E-3	g	N	1,40E+09	7,65E+6	< 0,1
77	Talco	3,28E-6	g	N	2,80E+10	9,19E+4	< 0,1
78	Tântalo	2,14E-14	g	N	1,70E+11	3,64E-3	< 0,1
79	Telúrio	2,86E-15	g	N	5,04E+13	1,44E-1	< 0,1
80	Turfa	3,17E+1	J	N	3,19E+04	1,01E+6	< 0,1
81	Ulexita	1,09E-14	g	N	1,68E+09	1,83E-5	< 0,1

82	Urânio	1,10E-3	g	N	1,60E+11	1,76E+8	< 0,1
83	Xisto	2,06E-6	g	N	1,68E+09	3,46E+3	< 0,1
84	Zinco	4,57E-5	g	N	7,20E+10	3,29E+6	< 0,1
85	Zircônio	2,94E-14	g	N	3,18E+10	9,36E-4	< 0,1
86	PyGas (PRODUTO)				1,03E+10	1,03E+13	100,0

Tabela B.5. Contabilidade em energia para a produção de 1 kg de xileno

	Insumo	Quantidade	Unidade	Classe	UEV (sej/unidade)	Energia (sej)	% de energia por insumo
1	Água de processo-origem não especificada	1,29E+4	J	R	6,89E+04	8,86E+8	< 0,1
2	Água resfriamento-origem não especificada	8,34E+3	g	R	2,70E+05	2,26E+9	< 0,1
3	Água-Lago	5,89E-1	g	R	4,52E+05	2,66E+5	< 0,1
4	Água-Mar	6,49E+3	J	R	5,36E+04	3,48E+8	< 0,1
5	Água-Poço natural	2,78E+2	J	R	6,89E+04	1,92E+7	< 0,1
6	Água-Rio	2,44E+2	g	R	3,41E+05	8,31E+7	< 0,1
7	Energia em biomassa	2,53E+4	J	R	6,75E+04	1,71E+9	< 0,1
8	Energia geopotencial da água	4,69E+4	J	R	1,35E+05	6,32E+9	0,1
9	Energia geotermica	1,04E+2	J	R	4,52E+05	4,71E+7	< 0,1
10	Energia cinética do vento	9,85E+3	J	R	9,90E+04	9,74E+8	< 0,1
11	Energia solar	5,70E+2	J	R	1,00E+00	5,70E+2	< 0,1
12	Madeira	8,02E+3	J	R	1,04E+04	8,34E+7	< 0,1
13	Alumínio	1,69E-2	g	N	5,40E+09	9,14E+7	< 0,1
14	Anidrita	7,29E-7	g	N	1,68E+09	1,22E+3	< 0,1
15	Areia	1,21E-5	g	N	1,68E+09	2,03E+4	< 0,1
16	Argila	5,43E-3	g	N	4,80E+09	2,61E+7	< 0,1
17	Barita	1,21E-3	g	N	1,68E+09	2,03E+6	< 0,1
18	Basalto	1,64E-8	g	N	7,56E+09	1,24E+2	< 0,1
19	Bórax	1,37E-7	g	N	1,68E+09	2,30E+2	< 0,1
20	Cádmio	7,85E-10	g	N	3,40E+13	2,67E+4	< 0,1
21	Calcita	1,25E+0	g	N	1,68E+09	2,10E+9	< 0,1
22	Carbono, no solo	8,49E-6	g	N	2,77E+09	2,35E+4	< 0,1
23	Carvão	1,80E+5	J	N	1,32E+05	2,38E+10	0,3
24	Cascalho	6,51E-2	g	N	8,40E+08	5,47E+7	< 0,1
25	Caulinita	4,06E-3	g	N	1,68E+09	6,83E+6	< 0,1
26	Cério	1,80E-4	g	N	1,14E+10	2,05E+6	< 0,1
27	Chumbo	2,24E-8	g	N	4,80E+11	1,07E+4	< 0,1
28	Cinábrio	1,23E-6	g	N	1,68E+09	2,07E+3	< 0,1
29	Cloreto de sódio	8,11E-1	g	N	1,68E+09	1,36E+9	< 0,1
30	Cobalto	3,78E-4	g	N	1,30E+11	4,91E+7	< 0,1
31	Cobre	1,88E-5	g	N	9,80E+10	1,84E+6	< 0,1

32	Colemanita	3,92E-6	g	N	1,68E+09	6,58E+3	< 0,1
33	Crisotila	1,33E-5	g	N	1,68E+09	2,23E+4	< 0,1
34	Cromo	2,07E-4	g	N	1,50E+11	3,10E+7	< 0,1
35	Diatomita	1,73E-10	g	N	1,68E+09	2,90E-1	< 0,1
36	Dióxido de carbono	3,79E+0	g	N	8,87E+07	3,36E+8	< 0,1
37	Dióxido de titânio	9,92E-3	g	N	3,82E+10	3,79E+8	< 0,1
38	Dolomita	7,04E-6	g	N	1,85E+10	1,30E+5	< 0,1
39	Enxofre	1,01E-3	g	N	2,08E+10	2,11E+7	< 0,1
40	Estanho	3,17E-7	g	N	1,70E+12	5,39E+5	< 0,1
41	Estibina	1,80E-11	g	N	1,68E+09	3,02E-2	< 0,1
42	Európio	4,51E-7	g	N	1,68E+09	7,57E+2	< 0,1
43	Feldspato	1,71E-12	g	N	1,68E+09	2,88E-3	< 0,1
44	Ferro	2,44E-3	g	N	1,20E+10	2,93E+7	< 0,1
45	Flúor	8,70E-4	g	N	1,68E+09	1,46E+6	< 0,1
46	Fluorita	1,79E-2	g	N	8,38E+08	1,50E+7	< 0,1
47	Fósforo	3,48E-3	g	N	2,07E+10	7,19E+7	< 0,1
48	Gadolínio	1,12E-6	g	N	1,68E+09	1,89E+3	< 0,1
49	Gás natural	5,03E+6	J	N	1,78E+05	8,95E+11	10,0
50	Gesso	1,76E-5	g	N	2,85E+09	5,02E+4	< 0,1
51	Granito	1,48E-12	g	N	8,40E+08	1,24E-3	< 0,1
52	Índio	1,16E-11	g	N	4,03E+11	4,69E+0	< 0,1
53	Kieserita	1,11E-7	g	N	1,68E+09	1,86E+2	< 0,1
54	Lantânio	5,39E-5	g	N	1,68E+09	9,06E+4	< 0,1
55	Lignita	1,60E+5	J	N	1,11E+05	1,78E+10	0,2
56	Lítio	2,58E-11	g	N	9,27E+11	2,39E+1	< 0,1
57	Magnésio	3,19E-15	g	N	1,68E+09	5,37E-6	< 0,1
58	Magnesita	1,06E-5	g	N	1,68E+09	1,79E+4	< 0,1
59	Manganês	9,70E-7	g	N	3,50E+11	3,40E+5	< 0,1
60	Molibdênio	7,18E-4	g	N	7,00E+11	5,02E+8	< 0,1
61	Neodímio	2,97E-5	g	N	1,68E+09	4,98E+4	< 0,1
62	Níquel	8,43E-4	g	N	2,00E+11	1,69E+8	< 0,1
63	Nitrato de sódio	6,98E-12	g	N	1,68E+09	1,17E-2	< 0,1
64	Olivina	2,48E-7	g	N	1,68E+09	4,17E+2	< 0,1
65	Ouro	2,05E-14	g	N	5,00E+11	1,03E-2	< 0,1
66	Paládio	1,22E-7	g	N	1,20E+11	1,46E+4	< 0,1
67	Petróleo	5,15E+7	J	N	1,56E+05	8,03E+12	89,4
68	Platina	3,78E-9	g	N	3,70E+11	1,40E+3	< 0,1
69	Praseodímio	3,15E-6	g	N	1,68E+09	5,29E+3	< 0,1
70	Prata	5,57E-14	g	N	4,50E+11	2,51E-2	< 0,1
71	Rênio	1,01E-9	g	N	8,93E+12	9,01E+3	< 0,1
72	rocha metamórfica, grafita	3,32E-5	g	N	1,68E+09	5,56E+4	< 0,1
73	Ródio	3,39E-9	g	N	1,20E+12	4,07E+3	< 0,1
74	Samário	2,25E-6	g	N	1,68E+09	3,77E+3	< 0,1
75	Silvinita	6,88E-6	g	N	1,68E+09	1,16E+4	< 0,1
76	Sulfato de sódio	5,07E-3	g	N	1,40E+09	7,07E+6	< 0,1
77	Talco	3,20E-6	g	N	2,80E+10	8,95E+4	< 0,1

78	Tântalo	2,03E-14	g	N	1,70E+11	3,44E-3	< 0,1
79	Telúrio	2,70E-15	g	N	5,04E+13	1,36E-1	< 0,1
80	Turfa	8,38E+0	J	N	3,19E+04	2,68E+5	< 0,1
81	Ulexita	1,03E-14	g	N	1,68E+09	1,73E-5	< 0,1
82	Urânio	6,34E-4	g	N	1,60E+11	1,01E+8	< 0,1
83	Xisto	2,06E-6	g	N	1,68E+09	3,47E+3	< 0,1
84	Zinco	1,57E-5	g	N	7,20E+10	1,13E+6	< 0,1
85	Zircónio	2,79E-14	g	N	3,18E+10	8,87E-4	< 0,1
86	Xileno (PRODUTO)				8,99E+09	8,99E+12	100,0

Tabela B.6. Contabilidade em energia para a produção de 1 kg de etileno

	Insumo	Quantidade	Unidade	Classe	UEV (sej/unidade)	Energia (sej)	% de energia por insumo
1	Água de processo-origem não especificada	1,33E+4	J	R	6,89E+04	9,17E+8	< 0,1
2	Água resfriamento-origem não especificada	1,39E+4	g	R	2,70E+05	3,76E+9	< 0,1
3	Água-Lago	9,85E-1	g	R	4,52E+05	4,45E+5	< 0,1
4	Água-Mar	6,45E+3	J	R	5,36E+04	3,46E+8	< 0,1
5	Água-Poço natural	6,68E+2	J	R	6,89E+04	4,60E+7	< 0,1
6	Água-Rio	2,86E+2	g	R	3,41E+05	9,74E+7	< 0,1
7	Energia em biomassa	1,30E+5	J	R	6,75E+04	8,79E+9	0,1
8	Energia geopotencial da água	1,40E+5	J	R	1,35E+05	1,89E+10	0,2
9	Energia geotermica	7,42E+2	J	R	4,52E+05	3,35E+8	< 0,1
10	Energia cinética do vento	3,94E+4	J	R	9,90E+04	3,90E+9	< 0,1
11	Energia solar	3,66E+3	J	R	1,00E+00	3,66E+3	< 0,1
12	Madeira	9,77E+3	J	R	1,04E+04	1,02E+8	< 0,1
13	Alumínio	1,59E-2	g	N	5,40E+09	8,59E+7	< 0,1
14	Anidrita	8,03E-7	g	N	1,68E+09	1,35E+3	< 0,1
15	Areia	1,64E-5	g	N	1,68E+09	2,76E+4	< 0,1
16	Argila	6,37E-3	g	N	4,80E+09	3,06E+7	< 0,1
17	Barita	1,60E-3	g	N	1,68E+09	2,68E+6	< 0,1
18	Basalto	1,89E-8	g	N	7,56E+09	1,43E+2	< 0,1
19	Bórax	1,61E-7	g	N	1,68E+09	2,70E+2	< 0,1
20	Cádmio	8,17E-10	g	N	3,40E+13	2,78E+4	< 0,1
21	Calcita	1,85E+0	g	N	1,68E+09	3,11E+9	< 0,1
22	Carbono, no solo	9,78E-6	g	N	2,77E+09	2,71E+4	< 0,1
23	Carvão	4,90E+5	J	N	1,32E+05	6,47E+10	0,6
24	Cascalho	6,56E-2	g	N	8,40E+08	5,51E+7	< 0,1
25	Caulinita	3,64E-3	g	N	1,68E+09	6,11E+6	< 0,1
26	Cério	1,61E-4	g	N	1,14E+10	1,83E+6	< 0,1
27	Chumbo	2,54E-8	g	N	4,80E+11	1,22E+4	< 0,1

28	Cinábrio	1,63E-6	g	N	1,68E+09	2,74E+3	< 0,1
29	Cloreto de sódio	7,95E-1	g	N	1,68E+09	1,34E+9	< 0,1
30	Cobalto	3,37E-4	g	N	1,30E+11	4,39E+7	< 0,1
31	Cobre	9,98E-5	g	N	9,80E+10	9,78E+6	< 0,1
32	Colemanita	4,59E-6	g	N	1,68E+09	7,71E+3	< 0,1
33	Crisotila	1,75E-5	g	N	1,68E+09	2,94E+4	< 0,1
34	Cromo	2,38E-4	g	N	1,50E+11	3,57E+7	< 0,1
35	Diatomita	2,03E-10	g	N	1,68E+09	3,40E-1	< 0,1
36	Dióxido de carbono	2,14E+1	g	N	8,87E+07	1,90E+9	< 0,1
37	Dióxido de titânio	1,18E-2	g	N	3,82E+10	4,52E+8	< 0,1
38	Dolomita	9,53E-6	g	N	1,85E+10	1,76E+5	< 0,1
39	Enxofre	7,21E-3	g	N	2,08E+10	1,50E+8	< 0,1
40	Estanho	2,84E-7	g	N	1,70E+12	4,83E+5	< 0,1
41	Estibina	2,11E-11	g	N	1,68E+09	3,54E-2	< 0,1
42	Európio	4,03E-7	g	N	1,68E+09	6,76E+2	< 0,1
43	Feldspato	1,98E-12	g	N	1,68E+09	3,33E-3	< 0,1
44	Ferro	4,64E-3	g	N	1,20E+10	5,57E+7	< 0,1
45	Flúor	1,04E-3	g	N	1,68E+09	1,75E+6	< 0,1
46	Fluorita	2,13E-2	g	N	8,38E+08	1,79E+7	< 0,1
47	Fósforo	4,15E-3	g	N	2,07E+10	8,58E+7	< 0,1
48	Gadolínio	1,00E-6	g	N	1,68E+09	1,69E+3	< 0,1
49	Gás natural	1,24E+7	J	N	1,78E+05	2,21E+12	19,3
50	Gesso	2,62E-5	g	N	2,85E+09	7,46E+4	< 0,1
51	Granito	1,70E-12	g	N	8,40E+08	1,43E-3	< 0,1
52	Índio	1,19E-11	g	N	4,03E+11	4,79E+0	< 0,1
53	Kieserita	1,28E-7	g	N	1,68E+09	2,16E+2	< 0,1
54	Lantânio	4,82E-5	g	N	1,68E+09	8,09E+4	< 0,1
55	Lignita	4,10E+5	J	N	1,11E+05	4,55E+10	0,4
56	Lítio	2,96E-11	g	N	9,27E+11	2,75E+1	< 0,1
57	Magnésio	3,74E-15	g	N	1,68E+09	6,29E-6	< 0,1
58	Magnesita	1,23E-5	g	N	1,68E+09	2,06E+4	< 0,1
59	Manganês	1,13E-6	g	N	3,50E+11	3,97E+5	< 0,1
60	Molibdênio	6,78E-04	g	N	7,00E+11	4,75E+8	< 0,1
61	Neodímio	2,65E-5	g	N	1,68E+09	4,45E+4	< 0,1
62	Níquel	8,97E-4	g	N	2,00E+11	1,79E+8	< 0,1
63	Nitrato de sódio	8,51E-12	g	N	1,68E+09	1,43E-2	< 0,1
64	Olivina	2,74E-7	g	N	1,68E+09	4,61E+2	< 0,1
65	Ouro	2,40E-14	g	N	5,00E+11	1,20E-2	< 0,1
66	Paládio	1,41E-7	g	N	1,20E+11	1,69E+4	< 0,1
67	Petróleo	5,80E+7	J	N	1,56E+05	9,05E+12	79,3
68	Platina	4,36E-9	g	N	3,70E+11	1,61E+3	< 0,1
69	Praseodímio	2,81E-6	g	N	1,68E+09	4,72E+3	< 0,1
70	Prata	6,52E-14	g	N	4,50E+11	2,93E-2	< 0,1
71	Rênio	1,16E-9	g	N	8,93E+12	1,04E+4	< 0,1
72	rocha metamórfica, grafita	2,97E-5	g	N	1,68E+09	4,98E+4	< 0,1
73	Ródio	3,90E-9	g	N	1,20E+12	4,68E+3	< 0,1

74	Samário	2,01E-6	g	N	1,68E+09	3,37E+3	< 0,1
75	Silvinita	7,96E-6	g	N	1,68E+09	1,34E+4	< 0,1
76	Sulfato de sódio	6,04E-3	g	N	1,40E+09	8,44E+6	< 0,1
77	Talco	3,68E-6	g	N	2,80E+10	1,03E+5	< 0,1
78	Tântalo	2,37E-14	g	N	1,70E+11	4,03E-3	< 0,1
79	Telúrio	3,17E-15	g	N	5,04E+13	1,60E-1	< 0,1
80	Turfa	3,51E+1	J	N	3,19E+04	1,12E+6	< 0,1
81	Ulexita	1,21E-14	g	N	1,68E+09	2,03E-5	< 0,1
82	Urânio	1,55E-3	g	N	1,60E+11	2,48E+8	< 0,1
83	Xisto	2,27E-6	g	N	1,68E+09	3,82E+3	< 0,1
84	Zinco	7,32E-5	g	N	7,20E+10	5,27E+6	< 0,1
85	Zircônio	3,26E-14	g	N	3,18E+10	1,04E-3	< 0,1
86	Etileno (PRODUTO)				1,14E+10	1,14E+13	100,0

Tabela B.7. Contabilidade em energia para a produção de 1 kg de para-xileno

	Insumo	Quantidade	Unidade	Classificação	UEV (sej/unidade)	Energia (sej)	% de energia por insumo
1	Água de processo-origem não especificada	1,62E+4	J	R	6,89E+04	1,11E+9	< 0,1
2	Água resfriamento-origem não especificada	1,74E+4	g	R	2,70E+05	4,70E+9	< 0,1
3	Água-Lago	6,90E-1	g	R	4,52E+05	3,12E+5	< 0,1
4	Água-Mar	7,69E+3	J	R	5,36E+04	4,12E+8	< 0,1
5	Água-Poço natural	4,62E+2	J	R	6,89E+04	3,18E+7	< 0,1
6	Água-Rio	2,85E+2	g	R	3,41E+05	9,72E+7	< 0,1
7	Energia em biomassa	5,86E+4	J	R	6,75E+04	3,96E+9	< 0,1
8	Energia geopotencial da água	8,52E+4	J	R	1,35E+05	1,15E+10	0,1
9	Energia geotermica	4,10E+2	J	R	4,52E+05	1,85E+8	< 0,1
10	Energia cinética do vento	2,18E+4	J	R	9,90E+04	2,16E+9	< 0,1
11	Energia solar	1,71E+3	J	R	1,00E+00	1,71E+3	< 0,1
12	Madeira	9,39E+3	J	R	1,04E+04	9,77E+7	< 0,1
13	Alumínio	2,05E-2	g	N	5,40E+09	1,11E+8	< 0,1
14	Anidrita	8,78E-7	g	N	1,68E+09	1,48E+3	< 0,1
15	Areia	1,52E-5	g	N	1,68E+09	2,55E+4	< 0,1
16	Argila	6,51E-3	g	N	4,80E+09	3,13E+7	< 0,1
17	Barita	1,68E-3	g	N	1,68E+09	2,81E+6	< 0,1
18	Basalto	1,94E-8	g	N	7,56E+09	1,46E+2	< 0,1
19	Bórax	1,60E-7	g	N	1,68E+09	2,69E+2	< 0,1
20	Cádmio	9,47E-10	g	N	3,40E+13	3,22E+4	< 0,1
21	Calcita	1,92E+0	g	N	1,68E+09	3,22E+9	< 0,1
22	Carbono, no solo	9,93E-6	g	N	2,77E+09	2,75E+4	< 0,1
23	Carvão	3,10E+5	J	N	1,32E+05	4,09E+10	0,4

24	Cascalho	7,80E-2	g	N	8,40E+08	6,55E+7	< 0,1
25	Caulinita	4,91E-3	g	N	1,68E+09	8,26E+6	< 0,1
26	Cério	2,18E-4	g	N	1,14E+10	2,48E+6	< 0,1
27	Chumbo	2,66E-8	g	N	4,80E+11	1,28E+4	< 0,1
28	Cinábrio	1,71E-6	g	N	1,68E+09	2,87E+3	< 0,1
29	Cloreto de sódio	1,15E+0	g	N	1,68E+09	1,93E+9	< 0,1
30	Cobalto	4,57E-4	g	N	1,30E+11	5,94E+7	< 0,1
31	Cobre	2,18E-5	g	N	9,80E+10	2,14E+6	< 0,1
32	Colemanita	4,58E-6	g	N	1,68E+09	7,70E+3	< 0,1
33	Crisotila	1,84E-5	g	N	1,68E+09	3,09E+4	< 0,1
34	Cromo	2,43E-4	g	N	1,50E+11	3,64E+7	< 0,1
35	Diatomita	2,02E-10	g	N	1,68E+09	3,39E-1	< 0,1
36	Dióxido de carbono	9,35E+0	g	N	8,87E+07	8,30E+8	< 0,1
37	Dióxido de titânio	1,16E-2	g	N	3,82E+10	4,42E+8	< 0,1
38	Dolomita	8,26E-6	g	N	1,85E+10	1,53E+5	< 0,1
39	Enxofre	2,93E-3	g	N	2,08E+10	6,09E+7	< 0,1
40	Estanho	3,83E-7	g	N	1,70E+12	6,52E+5	< 0,1
41	Estibina	2,10E-11	g	N	1,68E+09	3,53E-2	< 0,1
42	Európio	5,45E-7	g	N	1,68E+09	9,16E+2	< 0,1
43	Feldspato	2,01E-12	g	N	1,68E+09	3,38E-3	< 0,1
44	Ferro	3,26E-3	g	N	1,20E+10	3,91E+7	< 0,1
45	Flúor	1,01E-3	g	N	1,68E+09	1,71E+6	< 0,1
46	Fluorita	2,09E-2	g	N	8,38E+08	1,75E+7	< 0,1
47	Fósforo	4,06E-3	g	N	2,07E+10	8,38E+7	< 0,1
48	Gadolínio	1,36E-6	g	N	1,68E+09	2,29E+3	< 0,1
49	Gás natural	6,11E+6	J	N	1,78E+05	1,09E+12	10,3
50	Gesso	2,07E-5	g	N	2,85E+09	5,89E+4	< 0,1
51	Granito	1,74E-12	g	N	8,40E+08	1,46E-3	< 0,1
52	Índio	1,41E-11	g	N	4,03E+11	5,66E+0	< 0,1
53	Kieserita	1,30E-7	g	N	1,68E+09	2,19E+2	< 0,1
54	Lantânio	6,52E-5	g	N	1,68E+09	1,10E+5	< 0,1
55	Lignita	2,80E+5	J	N	1,11E+05	3,11E+10	0,3
56	Lítio	3,04E-11	g	N	9,27E+11	2,82E+1	< 0,1
57	Magnésio	3,74E-15	g	N	1,68E+09	6,28E-6	< 0,1
58	Magnesita	1,26E-5	g	N	1,68E+09	2,12E+4	< 0,1
59	Manganês	1,14E-6	g	N	3,50E+11	3,98E+5	< 0,1
60	Molibdênio	8,68E-4	g	N	7,00E+11	6,07E+8	< 0,1
61	Neodímio	3,59E-5	g	N	1,68E+09	6,03E+4	< 0,1
62	Níquel	1,01E-3	g	N	2,00E+11	2,01E+8	< 0,1
63	Nitrato de sódio	8,16E-12	g	N	1,68E+09	1,37E-2	< 0,1
64	Olivina	2,99E-7	g	N	1,68E+09	5,02E+2	< 0,1
65	Ouro	2,40E-14	g	N	5,00E+11	1,20E-2	< 0,1
66	Paládio	1,42E-7	g	N	1,20E+11	1,71E+4	< 0,1
67	Petróleo	6,01E+7	J	N	1,56E+05	9,38E+12	88,7
68	Platina	4,41E-9	g	N	3,70E+11	1,63E+3	< 0,1
69	Praseodímio	3,81E-6	g	N	1,68E+09	6,39E+3	< 0,1

70	Prata	6,51E-14	g	N	4,50E+11	2,93E-2	< 0,1
71	Rênio	1,18E-9	g	N	8,93E+12	1,05E+4	< 0,1
72	rocha metamórfica, grafita	4,01E-5	g	N	1,68E+09	6,73E+4	< 0,1
73	Ródio	3,95E-9	g	N	1,20E+12	4,74E+3	< 0,1
74	Samário	2,72E-6	g	N	1,68E+09	4,56E+3	< 0,1
75	Silvinita	8,06E-6	g	N	1,68E+09	1,35E+4	< 0,1
76	Sulfato de sódio	5,91E-3	g	N	1,40E+09	8,25E+6	< 0,1
77	Talco	3,80E-6	g	N	2,80E+10	1,06E+5	< 0,1
78	Tântalo	2,37E-14	g	N	1,70E+11	4,03E-3	< 0,1
79	Telúrio	3,16E-15	g	N	5,04E+13	1,59E-1	< 0,1
80	Turfa	1,01E+1	J	N	3,19E+04	3,21E+5	< 0,1
81	Ulexita	1,21E-14	g	N	1,68E+09	2,03E-5	< 0,1
82	Urânio	9,75E-4	g	N	1,60E+11	1,56E+8	< 0,1
83	Xisto	2,49E-6	g	N	1,68E+09	4,18E+3	< 0,1
84	Zinco	1,82E-5	g	N	7,20E+10	1,31E+6	< 0,1
85	Zircônio	3,26E-14	g	N	3,18E+10	1,04E-3	< 0,1
86	Paraxileno (PRODUTO)				1,06E+10	1,06E+13	100,0

Tabela B.8. Contabilidade em energia para a produção de 1 kg de óxido de etileno

	Insumo	Quantidade	Unidade	Classe	UEV (sej/unidade)	Energia (sej)	% de energia por insumo
1	Água de processo-origem não especificada	1,26E+4	J	R	6,89E+04	8,65E+8	< 0,1
2	Água resfriamento-origem não especificada	3,35E+4	g	R	2,70E+05	9,07E+9	0,1
3	Água-Lago	7,84E-1	g	R	4,52E+05	3,54E+5	< 0,1
4	Água-Mar	5,13E+3	J	R	5,36E+04	2,75E+8	< 0,1
5	Água-Poço natural	2,12E+3	J	R	6,89E+04	1,46E+8	< 0,1
6	Água-Rio	2,27E+2	g	R	3,41E+05	7,76E+7	< 0,1
7	Energia em biomassa	5,72E+5	J	R	6,75E+04	3,86E+10	0,4
8	Energia geopotencial da água	4,66E+5	J	R	1,35E+05	6,29E+10	0,6
9	Energia geotermica	3,49E+3	J	R	4,52E+05	1,58E+9	< 0,1
10	Energia cinética do vento	1,61E+5	J	R	9,90E+04	1,60E+10	0,2
11	Energia solar	1,69E+4	J	R	1,00E+00	1,69E+4	< 0,1
12	Madeira	7,75E+3	J	R	1,04E+04	8,06E+7	< 0,1
13	Alumínio	1,37E-2	g	N	5,40E+09	7,39E+7	< 0,1
14	Anidrita	6,39E-7	g	N	1,68E+09	1,07E+3	< 0,1
15	Areia	2,49E-5	g	N	1,68E+09	4,18E+4	< 0,1
16	Argila	5,07E-3	g	N	4,80E+09	2,44E+7	< 0,1
17	Barita	1,27E-3	g	N	1,68E+09	2,14E+6	< 0,1
18	Basalto	1,51E-8	g	N	7,56E+09	1,14E+2	< 0,1
19	Bórax	1,28E-7	g	N	1,68E+09	2,15E+2	< 0,1

20	Cádmio	6,50E-10	g	N	3,40E+13	2,21E+4	< 0,1
21	Calcita	5,41E+0	g	N	1,68E+09	9,08E+9	0,1
22	Carbono, no solo	7,78E-6	g	N	2,77E+09	2,16E+4	< 0,1
23	Carvão	1,69E+6	J	N	1,32E+05	2,23E+11	2,3
24	Cascalho	5,22E-2	g	N	8,40E+08	4,39E+7	< 0,1
25	Caulinita	2,90E-3	g	N	1,68E+09	4,86E+6	< 0,1
26	Cério	1,28E-4	g	N	1,14E+10	1,46E+6	< 0,1
27	Chumbo	2,02E-8	g	N	4,80E+11	9,70E+3	< 0,1
28	Cinábrio	1,30E-6	g	N	1,68E+09	2,18E+3	< 0,1
29	Cloreto de sódio	6,68E-1	g	N	1,68E+09	1,12E+9	< 0,1
30	Cobalto	2,69E-4	g	N	1,30E+11	3,49E+7	< 0,1
31	Cobre	7,94E-5	g	N	9,80E+10	7,78E+6	< 0,1
32	Colemanita	3,65E-6	g	N	1,68E+09	6,14E+3	< 0,1
33	Crisotila	1,39E-5	g	N	1,68E+09	2,34E+4	< 0,1
34	Cromo	1,90E-4	g	N	1,50E+11	2,85E+7	< 0,1
35	Diatomita	1,61E-10	g	N	1,68E+09	2,71E-1	< 0,1
36	Dióxido de carbono	9,63E+1	g	N	8,87E+07	8,54E+9	0,1
37	Dióxido de titânio	9,41E-3	g	N	3,82E+10	3,60E+8	< 0,1
38	Dolomita	7,59E-6	g	N	1,85E+10	1,40E+5	< 0,1
39	Enxofre	3,38E-2	g	N	2,08E+10	7,04E+8	< 0,1
40	Estanho	2,26E-7	g	N	1,70E+12	3,84E+5	< 0,1
41	Estibina	1,68E-11	g	N	1,68E+09	2,82E-2	< 0,1
42	Európio	3,20E-7	g	N	1,68E+09	5,38E+2	< 0,1
43	Feldspato	1,58E-12	g	N	1,68E+09	2,65E-3	< 0,1
44	Ferro	9,34E-3	g	N	1,20E+10	1,12E+8	< 0,1
45	Flúor	8,26E-4	g	N	1,68E+09	1,39E+6	< 0,1
46	Fluorita	1,70E-2	g	N	8,38E+08	1,42E+7	< 0,1
47	Fósforo	3,30E-3	g	N	2,07E+10	6,82E+7	< 0,1
48	Gadolínio	8,00E-7	g	N	1,68E+09	1,34E+3	< 0,1
49	Gás natural	1,11E+7	J	N	1,78E+05	1,97E+12	20,2
50	Gesso	2,08E-5	g	N	2,85E+09	5,94E+4	< 0,1
51	Granito	1,36E-12	g	N	8,40E+08	1,14E-3	< 0,1
52	Índio	9,47E-12	g	N	4,03E+11	3,82E+0	< 0,1
53	Kieserita	1,02E-7	g	N	1,68E+09	1,72E+2	< 0,1
54	Lantânio	3,83E-5	g	N	1,68E+09	6,44E+4	< 0,1
55	Lignita	1,34E+6	J	N	1,11E+05	1,49E+11	1,5
56	Lítio	2,36E-11	g	N	9,27E+11	2,19E+1	< 0,1
57	Magnésio	2,98E-15	g	N	1,68E+09	5,00E-6	< 0,1
58	Magnesita	9,75E-6	g	N	1,68E+09	1,64E+4	< 0,1
59	Manganês	9,03E-7	g	N	3,50E+11	3,16E+5	< 0,1
60	Molibdênio	5,40E-4	g	N	7,00E+11	3,78E+8	< 0,1
61	Neodímio	2,11E-5	g	N	1,68E+09	3,54E+4	< 0,1
62	Níquel	7,14E-4	g	N	2,00E+11	1,43E+8	< 0,1
63	Nitrato de sódio	6,77E-12	g	N	1,68E+09	1,14E-2	< 0,1
64	Olivina	2,18E-7	g	N	1,68E+09	3,67E+2	< 0,1
65	Ouro	1,91E-14	g	N	5,00E+11	9,56E-3	< 0,1

66	Paládio	1,12E-7	g	N	1,20E+11	1,34E+4	< 0,1
67	Petróleo	4,66E+7	J	N	1,56E+05	7,26E+12	74,5
68	Platina	3,47E-9	g	N	3,70E+11	1,28E+3	< 0,1
69	Praseodímio	2,24E-6	g	N	1,68E+09	3,76E+3	< 0,1
70	Prata	5,19E-14	g	N	4,50E+11	2,34E-2	< 0,1
71	Rênio	9,25E-10	g	N	8,93E+12	8,26E+3	< 0,1
72	rocha metamórfica, grafita	2,37E-5	g	N	1,68E+09	3,97E+4	< 0,1
73	Ródio	3,10E-9	g	N	1,20E+12	3,73E+3	< 0,1
74	Samário	1,60E-6	g	N	1,68E+09	2,68E+3	< 0,1
75	Silvinita	6,33E-6	g	N	1,68E+09	1,06E+4	< 0,1
76	Sulfato de sódio	4,81E-3	g	N	1,40E+09	6,72E+6	< 0,1
77	Talco	2,93E-6	g	N	2,80E+10	8,19E+4	< 0,1
78	Tântalo	1,89E-14	g	N	1,70E+11	3,21E-3	< 0,1
79	Telúrio	2,52E-15	g	N	5,04E+13	1,27E-1	< 0,1
80	Turfa	2,79E+1	J	N	3,19E+04	8,91E+5	< 0,1
81	Ulexita	9,63E-15	g	N	1,68E+09	1,62E-5	< 0,1
82	Urânio	5,01E-3	g	N	1,60E+11	8,02E+8	< 0,1
83	Xisto	1,81E-6	g	N	1,68E+09	3,04E+3	< 0,1
84	Zinco	5,83E-5	g	N	7,20E+10	4,20E+6	< 0,1
85	Zircônio	2,60E-14	g	N	3,18E+10	8,26E-4	< 0,1
86	Óxido de etileno (PRODUTO)				9,75E+09	9,75E+12	100,0

Tabela B.9. Contabilidade em energia para a produção de 1 kg de etilenoglicol

	Insumo	Quantidade	Unidad e	Class e	UEV (sej/unidad e)	Energia (sej)	% de energia por insumo
1	Água de processo-origem não especificada	3,40E+4	J	R	6,89E+04	2,34E+9	< 0,1
2	Água resfriamento-origem não especificada	3,35E+4	g	R	2,70E+05	9,06E+9	0,1
3	Água-Lago	5,59E-1	g	R	4,52E+05	2,53E+5	< 0,1
4	Água-Mar	3,66E+3	J	R	5,36E+04	1,96E+8	< 0,1
5	Água-Poço natural	2,22E+3	J	R	6,89E+04	1,53E+8	< 0,1
6	Água-Rio	1,62E+2	g	R	3,41E+05	5,53E+7	< 0,1
7	Energia em biomassa	6,16E+5	J	R	6,75E+04	4,16E+10	0,6
8	Energia geopotencial da água	4,90E+5	J	R	1,35E+05	6,61E+10	0,9
9	Energia geotermica	3,77E+3	J	R	4,52E+05	1,70E+9	< 0,1
10	Energia cinética do vento	1,73E+5	J	R	9,90E+04	1,71E+10	0,2
11	Energia solar	1,82E+4	J	R	1,00E+00	1,82E+4	< 0,1
12	Madeira	5,53E+3	J	R	1,04E+04	5,75E+7	< 0,1
13	Alumínio	1,02E-2	g	N	5,40E+09	5,51E+7	< 0,1
14	Anidrita	4,56E-7	g	N	1,68E+09	7,66E+2	< 0,1
15	Areia	2,30E-5	g	N	1,68E+09	3,87E+4	< 0,1

16	Argila	3,62E-3	g	N	4,80E+09	1,74E+7	< 0,1
17	Barita	9,07E-4	g	N	1,68E+09	1,52E+6	< 0,1
18	Basalto	1,07E-8	g	N	7,56E+09	8,12E+1	< 0,1
19	Bórax	9,12E-8	g	N	1,68E+09	1,53E+2	< 0,1
20	Cádmio	4,64E-10	g	N	3,40E+13	1,58E+4	< 0,1
21	Calcita	5,61E+0	g	N	1,68E+09	9,42E+9	0,1
22	Carbono, no solo	5,55E-6	g	N	2,77E+09	1,54E+4	< 0,1
23	Carvão	1,79E+6	J	N	1,32E+05	2,36E+11	3,3
24	Cascalho	3,73E-2	g	N	8,40E+08	3,13E+7	< 0,1
25	Caulinita	2,07E-3	g	N	1,68E+09	3,47E+6	< 0,1
26	Cério	9,12E-5	g	N	1,14E+10	1,04E+6	< 0,1
27	Chumbo	1,44E-8	g	N	4,80E+11	6,92E+3	< 0,1
28	Cinábrio	9,26E-7	g	N	1,68E+09	1,56E+3	< 0,1
29	Cloreto de sódio	4,92E-1	g	N	1,68E+09	8,26E+8	< 0,1
30	Cobalto	1,92E-4	g	N	1,30E+11	2,49E+7	< 0,1
31	Cobre	5,67E-5	g	N	9,80E+10	5,55E+6	< 0,1
32	Colemanita	2,61E-6	g	N	1,68E+09	4,38E+3	< 0,1
33	Crisotila	9,92E-6	g	N	1,68E+09	1,67E+4	< 0,1
34	Cromo	1,36E-4	g	N	1,50E+11	2,04E+7	< 0,1
35	Diatomita	1,15E-10	g	N	1,68E+09	1,93E-1	< 0,1
36	Dióxido de carbono	1,04E+2	g	N	8,87E+07	9,21E+9	0,1
37	Dióxido de titânio	6,72E-3	g	N	3,82E+10	2,57E+8	< 0,1
38	Dolomita	5,41E-6	g	N	1,85E+10	1,00E+5	< 0,1
39	Enxofre	3,66E-2	g	N	2,08E+10	7,62E+8	< 0,1
40	Estanho	1,61E-7	g	N	1,70E+12	2,74E+5	< 0,1
41	Estibina	1,20E-11	g	N	1,68E+09	2,01E-2	< 0,1
42	Európio	2,29E-7	g	N	1,68E+09	3,84E+2	< 0,1
43	Feldspato	1,12E-12	g	N	1,68E+09	1,89E-3	< 0,1
44	Ferro	9,17E-3	g	N	1,20E+10	1,10E+8	< 0,1
45	Flúor	5,89E-4	g	N	1,68E+09	9,90E+5	< 0,1
46	Fluorita	1,21E-2	g	N	8,38E+08	1,01E+7	< 0,1
47	Fósforo	2,36E-3	g	N	2,07E+10	4,87E+7	< 0,1
48	Gadolínio	5,71E-7	g	N	1,68E+09	9,59E+2	< 0,1
49	Gás natural	8,41E+6	J	N	1,78E+05	1,50E+12	20,6
50	Gesso	1,49E-5	g	N	2,85E+09	4,24E+4	< 0,1
51	Granito	9,68E-13	g	N	8,40E+08	8,13E-4	< 0,1
52	Índio	6,76E-12	g	N	4,03E+11	2,72E+0	< 0,1
53	Kieserita	7,29E-8	g	N	1,68E+09	1,22E+2	< 0,1
54	Lantânio	2,74E-5	g	N	1,68E+09	4,60E+4	< 0,1
55	Lignita	1,41E+6	J	N	1,11E+05	1,57E+11	2,2
56	Lítio	1,68E-11	g	N	9,27E+11	1,56E+1	< 0,1
57	Magnésio	2,13E-15	g	N	1,68E+09	3,57E-6	< 0,1
58	Magnesita	6,96E-6	g	N	1,68E+09	1,17E+4	< 0,1
59	Manganês	6,44E-7	g	N	3,50E+11	2,25E+5	< 0,1
60	Molibdênio	3,85E-4	g	N	7,00E+11	2,70E+8	< 0,1
61	Neodímio	1,50E-5	g	N	1,68E+09	2,53E+4	< 0,1

62	Níquel	5,10E-4	g	N	2,00E+11	1,02E+8	< 0,1
63	Nitrato de sódio	4,83E-12	g	N	1,68E+09	8,12E-3	< 0,1
64	Olivina	1,56E-7	g	N	1,68E+09	2,62E+2	< 0,1
65	Ouro	1,36E-14	g	N	5,00E+11	6,82E-3	< 0,1
66	Paládio	7,98E-8	g	N	1,20E+11	9,58E+3	< 0,1
67	Petróleo	3,34E+7	J	N	1,56E+05	5,21E+12	71,8
68	Platina	2,47E-9	g	N	3,70E+11	9,16E+2	< 0,1
69	Praseodímio	1,60E-6	g	N	1,68E+09	2,68E+3	< 0,1
70	Prata	3,70E-14	g	N	4,50E+11	1,67E-2	< 0,1
71	Rênio	6,60E-10	g	N	8,93E+12	5,90E+3	< 0,1
72	rocha metamórfica, grafita	1,69E-5	g	N	1,68E+09	2,83E+4	< 0,1
73	Ródio	2,22E-9	g	N	1,20E+12	2,66E+3	< 0,1
74	Samário	1,14E-6	g	N	1,68E+09	1,91E+3	< 0,1
75	Silvinita	4,52E-6	g	N	1,68E+09	7,59E+3	< 0,1
76	Sulfato de sódio	3,43E-3	g	N	1,40E+09	4,79E+6	< 0,1
77	Talco	2,09E-6	g	N	2,80E+10	5,85E+4	< 0,1
78	Tântalo	1,35E-14	g	N	1,70E+11	2,29E-3	< 0,1
79	Telúrio	1,80E-15	g	N	5,04E+13	9,06E-2	< 0,1
80	Turfa	1,99E+1	J	N	3,19E+04	6,35E+5	< 0,1
81	Ulexita	6,87E-15	g	N	1,68E+09	1,15E-5	< 0,1
82	Urânio	5,25E-3	g	N	1,60E+11	8,41E+8	< 0,1
83	Xisto	1,29E-6	g	N	1,68E+09	2,17E+3	< 0,1
84	Zinco	4,16E-5	g	N	7,20E+10	2,99E+6	< 0,1
85	Zircônio	1,85E-14	g	N	3,18E+10	5,89E-4	< 0,1
86	Etilenoglicol (PRODUTO)				7,26E+09	7,26E+12	100,0

Tabela B.10. Contabilidade em energia para a produção de 1 kg de PTA

	Insumo	Quantidade	Unidad e	Class e	UEV (sej/unidad e)	Energia (sej)	% de energia por insumo
1	Água de processo-origem não especificada	2,35E+4	J	R	6,89E+04	1,62E+9	< 0,1
2	Água resfriamento-origem não especificada	3,81E+4	g	R	2,70E+05	1,03E+10	0,1
3	Água-Lago	7,32E+0	g	R	4,52E+05	3,31E+6	< 0,1
4	Água-Mar	1,71E+4	J	R	5,36E+04	9,15E+8	< 0,1
5	Água-Poço natural	1,20E+3	J	R	6,89E+04	8,25E+7	< 0,1
6	Água-Rio	2,57E+4	g	R	3,41E+05	8,75E+9	0,1
7	Energia cinética do vento	1,32E+5	J	R	9,90E+04	1,31E+10	0,1
8	Energia em biomassa	2,12E+5	J	R	6,75E+04	1,43E+10	0,2
9	Energia geopotencial da água	2,42E+5	J	R	1,35E+05	3,26E+10	0,4
10	Energia geotermica	1,13E+3	J	R	4,52E+05	5,09E+8	< 0,1
11	Energia solar	3,60E+4	J	R	1,00E+00	3,60E+4	< 0,1

12	Madeira	1,64E+4	J	R	1,04E+04	1,71E+8	< 0,1
13	Alumínio	2,16E-2	g	N	5,40E+09	1,17E+8	< 0,1
14	Anidrita	1,82E-6	g	N	1,68E+09	3,05E+3	< 0,1
15	Areia	3,43E-5	g	N	1,68E+09	5,77E+4	< 0,1
16	Argila	2,88E-1	g	N	4,80E+09	1,39E+9	< 0,1
17	Barita	3,43E-3	g	N	1,68E+09	5,77E+6	< 0,1
18	Basalto	1,95E-7	g	N	7,56E+09	1,47E+3	< 0,1
19	Bórax	2,75E-7	g	N	1,68E+09	4,61E+2	< 0,1
20	Brometo de sódio	4,19E-1	g	N	1,68E+09	7,03E+8	< 0,1
21	Cádmio	1,06E-8	g	N	3,40E+13	3,62E+5	< 0,1
22	Calcita	8,77E+0	g	N	1,68E+09	1,47E+10	0,2
23	Carbono, no solo	1,23E-5	g	N	2,77E+09	3,42E+4	< 0,1
24	Carvão	8,20E+5	J	N	1,32E+05	1,08E+11	1,2
25	Cascalho	1,05E+1	g	N	8,40E+08	8,79E+9	0,1
26	Caulinita	3,57E-3	g	N	1,68E+09	6,00E+6	< 0,1
27	Cério	1,43E-4	g	N	1,14E+10	1,63E+6	< 0,1
28	Chumbo	4,60E-8	g	N	4,80E+11	2,21E+4	< 0,1
29	Cinábrio	1,44E-5	g	N	1,68E+09	2,43E+4	< 0,1
30	Cloreto de sódio	1,12E+1	g	N	1,68E+09	1,87E+10	0,2
31	Cobalto	2,89E-1	g	N	1,30E+11	3,75E+10	0,4
32	Cobre	1,62E-3	g	N	9,80E+10	1,59E+8	< 0,1
33	Colemanita	7,62E-6	g	N	1,68E+09	1,28E+4	< 0,1
34	Crisotila	5,35E-5	g	N	1,68E+09	8,99E+4	< 0,1
35	Cromo	5,39E-4	g	N	1,50E+11	8,09E+7	< 0,1
36	Diatomita	3,37E-10	g	N	1,68E+09	5,65E-1	< 0,1
37	Dióxido de carbono	3,48E+1	g	N	8,87E+07	3,09E+9	< 0,1
38	Dióxido de titânio	1,02E-2	g	N	3,82E+10	3,89E+8	< 0,1
39	Dolomita	3,91E-3	g	N	1,85E+10	7,24E+7	< 0,1
40	Enxofre	1,45E-2	g	N	2,08E+10	3,03E+8	< 0,1
41	Estanho	2,68E-7	g	N	1,70E+12	4,56E+5	< 0,1
42	Estibina	3,50E-11	g	N	1,68E+09	5,88E-2	< 0,1
43	Európio	3,59E-7	g	N	1,68E+09	6,03E+2	< 0,1
44	Feldspato	1,58E-11	g	N	1,68E+09	2,66E-2	< 0,1
45	Ferro	5,94E-3	g	N	1,20E+10	7,13E+7	< 0,1
46	Flúor	8,34E-4	g	N	1,68E+09	1,40E+6	< 0,1
47	Fluorita	1,77E-2	g	N	8,38E+08	1,48E+7	< 0,1
48	Fósforo	3,33E-3	g	N	2,07E+10	6,89E+7	< 0,1
49	Gadolínio	8,96E-7	g	N	1,68E+09	1,50E+3	< 0,1
50	Gás natural	1,11E+7	J	N	1,78E+05	1,97E+12	22,3
51	Gesso	2,10E-5	g	N	2,85E+09	5,99E+4	< 0,1
52	Granito	1,54E-11	g	N	8,40E+08	1,29E-2	< 0,1
53	Índio	1,68E-10	g	N	4,03E+11	6,75E+1	< 0,1
54	Kieserita	9,32E-7	g	N	1,68E+09	1,56E+3	< 0,1
55	Lantânio	4,30E-5	g	N	1,68E+09	7,22E+4	< 0,1
56	Lignita	5,40E+5	J	N	1,11E+05	5,99E+10	0,7
57	Lítio	3,77E-10	g	N	9,27E+11	3,49E+2	< 0,1

58	Magnésio	6,24E-15	g	N	1,68E+09	1,05E-5	< 0,1
59	Magnesita	2,85E-4	g	N	1,68E+09	4,78E+5	< 0,1
60	Manganês	5,04E-1	g	N	3,50E+11	1,76E+11	2,0
61	Molibdênio	1,29E-3	g	N	7,00E+11	9,01E+8	< 0,1
62	Neodímio	2,36E-5	g	N	1,68E+09	3,97E+4	< 0,1
63	Níquel	2,19E-3	g	N	2,00E+11	4,37E+8	< 0,1
64	Nitrato de sódio	9,78E-12	g	N	1,68E+09	1,64E-2	< 0,1
65	Olivina	6,06E-7	g	N	1,68E+09	1,02E+3	< 0,1
66	Ouro	4,06E-14	g	N	5,00E+11	2,03E-2	< 0,1
67	Paládio	1,80E-7	g	N	1,20E+11	2,16E+4	< 0,1
68	Petróleo	4,08E+7	J	N	1,56E+05	6,36E+12	71,9
69	Platina	5,57E-9	g	N	3,70E+11	2,06E+3	< 0,1
70	Praseodímio	2,51E-6	g	N	1,68E+09	4,21E+3	< 0,1
71	Prata	1,09E-13	g	N	4,50E+11	4,90E-2	< 0,1
72	Rênio	1,44E-9	g	N	8,93E+12	1,29E+4	< 0,1
73	rocha metamórfica, grafita	3,33E-5	g	N	1,68E+09	5,58E+4	< 0,1
74	Ródio	4,99E-9	g	N	1,20E+12	5,98E+3	< 0,1
75	Samário	1,79E-6	g	N	1,68E+09	3,00E+3	< 0,1
76	Silvinita	1,87E-5	g	N	1,68E+09	3,14E+4	< 0,1
77	Sulfato de sódio	4,85E-3	g	N	1,40E+09	6,77E+6	< 0,1
78	Talco	7,89E-5	g	N	2,80E+10	2,21E+6	< 0,1
79	Tântalo	3,96E-14	g	N	1,70E+11	6,73E-3	< 0,1
80	Telúrio	5,33E-15	g	N	5,04E+13	2,69E-1	< 0,1
81	Turfa	9,42E+1	J	N	3,19E+04	3,01E+6	< 0,1
82	Ulexita	2,02E-14	g	N	1,68E+09	3,39E-5	< 0,1
83	Urânio	2,92E-3	g	N	1,60E+11	4,68E+8	< 0,1
84	Xisto	5,14E-6	g	N	1,68E+09	8,64E+3	< 0,1
85	Zinco	1,18E-3	g	N	7,20E+10	8,47E+7	< 0,1
86	Zircônio	5,44E-14	g	N	3,18E+10	1,73E-3	< 0,1
87	PTA (PRODUTO)				8,85E+09	8,85E+12	100,0

Tabela B.11. Contabilidade em energia para a produção de 1 kg de PET

	Insumo	Quantidade	Unidad e	Class e	UEV (sej/unidad e)	Energia (sej)	% de energia por insumo
1	Água de processo-origem não especificada	1,77E+4	J	R	6,89E+04	1,22E+9	< 0,1
2	Água resfriamento-origem não especificada	5,12E+4	g	R	2,70E+05	1,39E+10	0,1
3	Água-Lago	1,52E+3	g	R	4,52E+05	6,85E+8	< 0,1
4	Água-Mar	2,77E+2	J	R	5,36E+04	1,48E+7	< 0,1
5	Água-Poço natural	2,66E+3	J	R	6,89E+04	1,83E+8	< 0,1
6	Água-Rio	1,77E+3	g	R	3,41E+05	6,03E+8	< 0,1

7	Energia em biomassa	4,22E+5	J	R	6,75E+4	2,85E+10	0,3
8	Energia geopotencial da água	3,39E+5	J	R	1,35E+5	4,56E+10	0,4
9	Energia outros R	4,55E+5	J	R	9,18E+4	4,17E+10	0,4
10	Madeira	9,64E+3	J	R	1,04E+4	1,00E+8	< 0,1
11	Alumínio	1,14E-2	g	N	5,40E+9	6,15E+7	< 0,1
12	Areia	5,61E-5	g	N	1,68E+09	9,43E+4	< 0,1
13	Argila	1,95E-1	g	N	4,80E+09	9,39E+8	< 0,1
14	Barita	2,67E-2	g	N	1,68E+9	4,49E+7	< 0,1
15	Basalto	3,61E-7	g	N	7,56E+9	2,73E+3	< 0,1
16	Bórax	1,63E-7	g	N	1,68E+9	2,75E+2	< 0,1
17	Brometo de sódio	4,40E-1	g	N	1,68E+09	7,39E+8	< 0,1
18	Cádmio	6,54E-9	g	N	3,40E+13	2,22E+5	< 0,1
19	Calcita	9,02E+0	g	N	1,68E+9	1,51E+10	0,1
20	Carbono, no solo	3,34E-5	g	N	2,77E+09	9,25E+4	< 0,1
21	Carvão	2,45E+6	J	N	1,32E+05	3,24E+11	3,0
22	Cascalho	6,65E+0	g	N	8,40E+08	5,59E+9	0,1
23	Caulinita	6,87E-4	g	N	1,68E+09	1,15E+6	< 0,1
24	Chumbo	4,31E-8	g	N	4,80E+11	2,07E+4	< 0,1
25	Cloreto de potássio	4,02E-5	g	N	4,97E+09	2,00E+5	< 0,1
26	Cloreto de sódio	1,30E+1	g	N	1,68E+09	2,19E+10	0,2
27	Cobalto	1,80E-1	g	N	1,30E+11	2,34E+10	0,2
28	Cobre	1,07E-3	g	N	9,80E+10	1,05E+8	< 0,1
29	Colemanita	4,53E-6	g	N	1,68E+09	7,62E+3	< 0,1
30	Crisotila	2,97E-4	g	N	1,68E+09	4,98E+5	< 0,1
31	Cromo	1,13E-2	g	N	1,50E+11	1,70E+9	< 0,1
32	Diatomita	2,00E-10	g	N	1,68E+09	3,36E-1	< 0,1
33	Dióxido de carbono	4,80E+1	g	N	8,87E+7	4,26E+9	< 0,1
34	Dióxido de titânio	4,89E-3	g	N	3,82E+10	1,87E+8	< 0,1
35	Dolomita	2,53E-3	g	N	1,85E+10	4,69E+7	< 0,1
36	Enxofre	4,60E-2	g	N	2,08E+10	9,58E+8	< 0,1
37	Estanho	3,01E-8	g	N	1,70E+12	5,11E+4	< 0,1
38	Estibina	2,71E-1	g	N	1,68E+09	4,55E+8	< 0,1
39	Feldspato	2,07E-9	g	N	1,68E+09	3,48E+0	< 0,1
40	Ferro	4,18E-2	g	N	1,20E+10	5,02E+8	< 0,1
41	Flúor	8,13E-3	g	N	1,68E+09	1,37E+7	< 0,1
42	Fluorita	8,37E-3	g	N	8,38E+08	7,02E+6	< 0,1
43	Fósforo	3,25E-2	g	N	2,07E+10	6,71E+8	< 0,1
44	Gás natural	1,67E+7	J	N	1,78E+05	2,97E+12	27,6
45	Gesso	3,19E-6	g	N	2,85E+09	9,10E+3	< 0,1
46	Granito	2,07E-9	g	N	8,40E+08	1,74E+0	< 0,1
47	Índio	1,03E-10	g	N	4,03E+11	4,15E+1	< 0,1
48	Kieserita	1,69E-6	g	N	1,68E+09	2,84E+3	< 0,1
49	Lignita	1,39E+6	J	N	1,11E+05	1,54E+11	1,4
50	Magnésio	3,73E-15	g	N	1,68E+09	6,26E-6	< 0,1
51	Magnesita	6,86E-4	g	N	1,68E+09	1,15E+6	< 0,1
52	Manganês	3,15E-1	g	N	3,50E+11	1,10E+11	1,0

53	Mercurio	2,71E-5	g	N	4,20E+13	1,14E+9	< 0,1
54	Molibdênio	4,75E-4	g	N	7,00E+11	3,32E+8	< 0,1
55	Níquel	2,63E-2	g	N	2,00E+11	5,26E+9	< 0,1
56	Nitrato de sódio	3,33E-12	g	N	1,68E+09	5,60E-3	< 0,1
57	Olivina	7,05E-7	g	N	1,68E+09	1,19E+3	< 0,1
58	Ouro	2,44E-14	g	N	5,00E+11	1,22E-2	< 0,1
59	Paládio	1,13E-5	g	N	1,20E+11	1,36E+6	< 0,1
60	Petróleo	4,49E+7	J	N	1,56E+05	7,00E+12	64,9
61	Platina	1,95E-9	g	N	3,70E+11	7,20E+2	< 0,1
62	Prata	6,51E-14	g	N	4,50E+11	2,93E-2	< 0,1
63	Rênio	4,83E-10	g	N	8,93E+12	4,31E+3	< 0,1
64	Rocha metamórfica, grafita	8,31E-6	g	N	1,68E+09	1,39E+4	< 0,1
65	Ródio	1,74E-9	g	N	1,20E+12	2,09E+3	< 0,1
66	Rutilo	2,07E-9	g	N	1,68E+09	3,48E+0	< 0,1
67	Sulfato de sódio	2,24E-3	g	N	1,40E+09	3,13E+6	< 0,1
68	Talco	9,79E-5	g	N	2,80E+10	2,74E+6	< 0,1
69	Tântalo	2,36E-14	g	N	1,70E+11	4,02E-3	< 0,1
70	Telúrio	3,20E-15	g	N	5,04E+13	1,61E-1	< 0,1
71	Turfa	1,50E+1	J	N	3,19E+4	4,79E+5	< 0,1
72	Ulexita	1,21E-14	g	N	1,68E+09	2,02E-5	< 0,1
73	Urânio	6,78E-3	g	N	1,60E+11	1,08E+9	< 0,1
74	Xisto	6,13E-6	g	N	1,68E+09	1,03E+4	< 0,1
75	Zinco	8,11E-4	g	N	7,20E+10	5,84E+7	< 0,1
76	Zircônio	3,25E-14	g	N	3,18E+10	1,03E-3	< 0,1
77	PET (PRODUTO)				1,08E+10	1,08E+13	100,0

Anexo C – MEMORIAL DE CÁLCULO PARA AS TABELAS DE EMERGIA

C.1. Conversão de unidades na tabela para 1 kg de Petróleo

1. Água (abastecimento público)

Quantidade total = 78,6 mg

Fator de conversão = 4,186 J/g

Total = (78,6 mg) x (1x 10⁻³ g/mg) x (4,186 J/g) = 3,29 x10⁻¹ J

2. Água (Mar)

Quantidade total = 20 mg

Fator de conversão = 4,186 J/g

Total = (20 mg) x (1x 10⁻³ g/mg) x (4,186 J/g) = 8,9 x10⁻² J

3. Água (Origem não especificada)

Quantidade total = 15647 mg

Fator de conversão = 4,186 J/g

Total = (15647 mg) x (1x 10⁻³ g/mg) x (4,186 J/g) = 65,5 J

4. Água (Poço natural)

Quantidade total = 2,07 x10⁻² mg

Fator de conversão = 4,186 J/g

Total = (2,07 x10⁻² mg) x (1x 10⁻³ g/mg) x (4,186 J/g) = 8,65 x10⁻⁵ J

31. Enxofre

Quantidade total = 1,57 x 10⁻⁷ MJ

Poder calorífico = 9,165 MJ/kg

Total = (1,57 x 10⁻⁷ MJ) x ((9,165)⁻¹ MJ/kg) x (1000g/kg) = 1,72 x10⁻² g

49. Urânio

Quantidade total = 2,23 x 10⁻¹ MJ

Poder calorífico = 560 MJ/g

Total = (2,23 x 10⁻¹ MJ) x ((560)⁻¹ MJ/g) = 3,98 x10⁻⁴ g

C.2. Conversão de unidades na tabela para 1 kg de Gás Natural

1. Água (abastecimento público)

Quantidade total = 175,64 mg

Fator de conversão = 4,186 J/g

Total = (175,64 mg) x (1x 10⁻³ g/mg) x (4,186 J/g) = 7,35 x10⁻¹ J

2. Água (Mar)

Quantidade total = 44,78 mg

Fator de conversão = 4,186 J/g

Total = (44,78 mg) x (1x 10⁻³ g/mg) x (4,186 J/g) = 1,87 x10⁻¹ J

3. Água (poço natural)

Quantidade total = 4,62 x10⁻² mg

Fator de conversão = 4,186 J/g

Total = (4,62 x10⁻² mg) x (1x 10⁻³ g/mg) x (4,186 J/g) = 1,93 x10⁻⁴ J

4. Água (Origem não especificada)

Quantidade total = 34782 mg

Fator de conversão = 4,186 J/g

Total = (34782 mg) x (1x 10⁻³ g/mg) x (4,186 J/g) = 145,6 J

31. Enxofre

Quantidade total = 3,51 x 10⁻⁷ MJ

Poder calorífico = 9,165 MJ/kg

Total = (3,51 x 10⁻⁷ MJ) x ((9,165)⁻¹ MJ/kg) x (1000g/kg) = 3,83 x10⁻⁵ g

49. Urânio

Quantidade total = 6,61 x 10⁻¹ MJ

Poder calorífico = 560 MJ/g

Total = (6,61 x 10⁻¹ MJ) x ((560)⁻¹ MJ/g) = 1,18 x10⁻³ g

C.3. Conversão de unidades na tabela para 1 kg de Nafta

1. Água (Abastecimento público)

Quantidade total = 183,60 mg

Fator de conversão = 4,186 J/g

Total = (183,60 mg) x (1x 10⁻³ g/mg) x (4,186 J/g) = 7,69 x10⁻¹ J

2. Água (Mar)

Quantidade total = 46,81 mg

Fator de conversão = 4,186 J/g

Total = (46,81 mg) x (1x 10⁻³ g/mg) x (4,186 J/g) = 1,96 x10⁻¹ J

3. Água (Poço natural)

Quantidade total = 4,83 x10⁻² mg

Fator de conversão = 4,186 J/g

Total = (4,83 x10⁻² mg) x (1x 10⁻³ g/mg) x (4,186 J/g) = 2,02 x10⁻⁴ J

4. Água (origem não especificada)

Quantidade total = 61515 mg

Fator de conversão = 4,186 J/g

$$\text{Total} = (61515 \text{ mg}) \times (1 \times 10^{-3} \text{ g/mg}) \times (4,186 \text{ J/g}) = 257,51 \text{ J}$$

31. Enxofre

Quantidade total = $3,67 \times 10^{-7} \text{ MJ}$

Poder calorífico = 9,165 MJ/kg

$$\text{Total} = (3,67 \times 10^{-7} \text{ MJ}) \times ((9,165)^{-1} \text{ MJ/kg}) \times (1000 \text{ g/kg}) = 4,01 \times 10^{-5} \text{ g}$$

49. Urânio

Quantidade total = $2,36 \times 10^{-1} \text{ MJ}$

Poder calorífico = 560 MJ/g

$$\text{Total} = (2,36 \times 10^{-1} \text{ MJ}) \times ((560)^{-1} \text{ MJ/g}) = 4,21 \times 10^{-4} \text{ g}$$

C.4. Conversão de unidades na tabela para 1 kg de Gasolina da pirólise (Pygas)

1. Água (do processo - origem não especificada)

Quantidade total = $2,82 \times 10^{-3} \text{ m}^3$

Fator de conversão = 4,186 J/g

$$\text{Total} = (2,82 \times 10^{-3} \text{ m}^3) \times (1000 \text{ kg/m}^3) \times (1000 \text{ g/kg}) \times (4,186 \text{ J/g}) = 11820 \text{ J}$$

2. Água (para resfriamento- origem não especificada)

Quantidade total = $9,60 \times 10^{-3} \text{ m}^3$

Densidade da água = 1000 kg/m^3

$$\text{Total} = (9,6 \times 10^{-3} \text{ m}^3) \times (1000 \text{ kg/m}^3) \times (1000 \text{ g/kg}) = 9605 \text{ g}$$

3. Água (lago)

Quantidade total = $7,77 \times 10^{-7} \text{ m}^3$

Densidade da água = 1000 kg/m^3

$$\text{Total} = (7,77 \times 10^{-7} \text{ m}^3) \times (1000 \text{ kg/m}^3) \times (1000 \text{ g/kg}) = 7,77 \times 10^{-1} \text{ g}$$

4. Água (mar)

Quantidade total = $1,40 \times 10^{-3} \text{ m}^3$

Fator de conversão = 4,186 J/g

$$\text{Total} = (1,40 \times 10^{-3} \text{ m}^3) \times (1000 \text{ kg/m}^3) \times (1000 \text{ g/kg}) \times (4,186 \text{ J/g}) = 5845 \text{ J}$$

5. Água (Poço natural)

Quantidade total = $1,14 \times 10^{-4} \text{ m}^3$

Fator de conversão = 4,186 J/g

$$\text{Total} = (1,14 \times 10^{-4} \text{ m}^3) \times (1000 \text{ kg/m}^3) \times (1000 \text{ g/kg}) \times (4,186 \text{ J/g}) = 477 \text{ J}$$

6. Água (rio)

$$\text{Quantidade total} = 2,58 \times 10^{-4} \text{ m}^3$$

$$\text{Densidade da água} = 1000 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Total} = (2,58 \times 10^{-4} \text{ m}^3) \times (1000 \text{ kg/m}^3) \times (1000 \text{ g/kg}) = 257,52 \text{ g}$$

12. Madeira

$$\text{Quantidade total} = 9,45 \times 10^{-7} \text{ m}^3$$

$$\text{Densidade da madeira} = 6 \times 10^{-1} \text{ g/cm}^3$$

$$\text{Poder calorífico} = 15,5 \text{ MJ/kg}$$

$$\text{Total} = (9,45 \times 10^{-7} \text{ m}^3) \times (6 \times 10^{-1} \text{ g/cm}^3) \times (1 \times 10^6 \text{ cm}^3/\text{m}^3) \times (15,5 \text{ MJ/kg}) \times ((1000)^{-1} \text{ g/kg}) \times (1 \times 10^6 \text{ J/MJ}) = 8786 \text{ J}$$

80. Turfa

$$\text{Quantidade total} = 1,98 \times 10^{-6} \text{ kg}$$

$$\text{Poder calorífico} = 16 \text{ MJ/kg}$$

$$\text{Total} = (1,98 \times 10^{-6} \text{ kg}) \times (16 \text{ MJ/kg}) \times (1 \times 10^6 \text{ J/MJ}) = 31,68 \text{ J}$$

C.5. Conversão de unidades na tabela para 1 kg de Xileno**1. Água (do processo - origem não especificada)**

$$\text{Quantidade total} = 3,07 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$\text{Fator de conversão} = 4,186 \text{ J/g}$$

$$\text{Total} = (3,07 \times 10^{-3} \text{ m}^3) \times (1000 \text{ kg/m}^3) \times (1000 \text{ g/kg}) \times (4,186 \text{ J/g}) = 12868 \text{ J}$$

2. Água (para resfriamento- origem não especificada)

$$\text{Quantidade total} = 8,34 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$\text{Densidade da água} = 1000 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Total} = (8,34 \times 10^{-3} \text{ m}^3) \times (1000 \text{ kg/m}^3) \times (1000 \text{ g/kg}) = 8334 \text{ g}$$

3. Água (lago)

$$\text{Quantidade total} = 5,89 \times 10^{-7} \text{ m}^3$$

$$\text{Densidade da água} = 1000 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Total} = (5,89 \times 10^{-7} \text{ m}^3) \times (1000 \text{ kg/m}^3) \times (1000 \text{ g/kg}) = 5,89 \times 10^{-1} \text{ g}$$

4. Água (mar)

$$\text{Quantidade total} = 1,55 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$\text{Fator de conversão} = 4,186 \text{ J/g}$$

$$\text{Total} = (1,55 \times 10^{-3} \text{ m}^3) \times (1000 \text{ kg/m}^3) \times (1000 \text{ g/kg}) \times (4,186 \text{ J/g}) = 6491 \text{ J}$$

5. Água (Poço natural)

$$\text{Quantidade total} = 6,65 \times 10^{-5} \text{ m}^3$$

$$\text{Fator de conversão} = 4,186 \text{ J/g}$$

$$\text{Total} = (6,65 \times 10^{-5} \text{ m}^3) \times (1000 \text{ kg/m}^3) \times (1000 \text{ g/kg}) \times (4,186 \text{ J/g}) = 278,4 \text{ J}$$

6. Água (rio)

$$\text{Quantidade total} = 2,44 \times 10^{-4} \text{ m}^3$$

$$\text{Densidade da água} = 1000 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Total} = (2,44 \times 10^{-4} \text{ m}^3) \times (1000 \text{ kg/m}^3) \times (1000 \text{ g/kg}) = 243,77 \text{ g}$$

12. Madeira

$$\text{Quantidade total} = 8,63 \times 10^{-7} \text{ m}^3$$

$$\text{Densidade da madeira} = 6 \times 10^{-1} \text{ g/cm}^3$$

$$\text{Poder calorífico} = 15,5 \text{ MJ/kg}$$

$$\text{Total} = (8,63 \times 10^{-7} \text{ m}^3) \times (6 \times 10^{-1} \text{ g/cm}^3) \times (1 \times 10^6 \text{ cm}^3/\text{m}^3) \times (15,5 \text{ MJ/kg}) \times ((1000)^{-1} \text{ g/kg}) \times (1 \times 10^6 \text{ J/MJ}) = 8023 \text{ J}$$

80. Turfa

$$\text{Quantidade total} = 5,25 \times 10^{-7} \text{ kg}$$

$$\text{Poder calorífico} = 16 \text{ MJ/kg}$$

$$\text{Total} = (5,25 \times 10^{-7} \text{ kg}) \times (16 \text{ MJ/kg}) \times (1 \times 10^6 \text{ J/MJ}) = 8,38 \text{ J}$$

C.6. Conversão de unidades na tabela para 1 kg de Para-xileno**1. Água (do processo - origem não especificada)**

$$\text{Quantidade total} = 3,86 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$\text{Fator de conversão} = 4,186 \text{ J/g}$$

$$\text{Total} = (3,86 \times 10^{-3} \text{ m}^3) \times (1000 \text{ kg/m}^3) \times (1000 \text{ g/kg}) \times (4,186 \text{ J/g}) = 16152 \text{ J}$$

2. Água (para resfriamento- origem não especificada)

$$\text{Quantidade total} = 1,74 \times 10^{-2} \text{ m}^3$$

$$\text{Densidade da água} = 1000 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Total} = (1,74 \times 10^{-2} \text{ m}^3) \times (1000 \text{ kg/m}^3) \times (1000 \text{ g/kg}) = 17375 \text{ g}$$

3. Água (lago)

$$\text{Quantidade total} = 6,90 \times 10^{-7} \text{ m}^3$$

$$\text{Densidade da água} = 1000 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Total} = (6,90 \times 10^{-7} \text{ m}^3) \times (1000 \text{ kg/m}^3) \times (1000 \text{ g/kg}) = 6,9 \times 10^{-1} \text{ g}$$

4. Água (mar)

$$\text{Quantidade total} = 1,84 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$\text{Fator de conversão} = 4,186 \text{ J/g}$$

$$\text{Total} = (1,84 \times 10^{-3} \text{ m}^3) \times (1000 \text{ kg/m}^3) \times (1000 \text{ g/kg}) \times (4,186 \text{ J/g}) = 7685 \text{ J}$$

5. Água (Poço natural)

$$\text{Quantidade total} = 1,10 \times 10^{-4} \text{ m}^3$$

Fator de conversão = 4,186 J/g

$$\text{Total} = (1,10 \times 10^{-4} \text{ m}^3) \times (1000 \text{ kg/m}^3) \times (1000 \text{ g/kg}) \times (4,186 \text{ J/g}) = 461,56 \text{ J}$$

6. Água (rio)

Quantidade total = $2,85 \times 10^{-4} \text{ m}^3$

Densidade da água = 1000 kg/m^3

$$\text{Total} = (2,85 \times 10^{-4} \text{ m}^3) \times (1000 \text{ kg/m}^3) \times (1000 \text{ g/kg}) = 285,13 \text{ g}$$

12. Madeira

Quantidade total = $1,01 \times 10^{-6} \text{ m}^3$

Densidade da madeira = $6 \times 10^{-1} \text{ g/cm}^3$

Poder calorífico = 15,5 MJ/kg

$$\text{Total} = (1,01 \times 10^{-6} \text{ m}^3) \times (6 \times 10^{-1} \text{ g/cm}^3) \times (1 \times 10^6 \text{ cm}^3/\text{m}^3) \times (15,5 \text{ MJ/kg}) \times ((1000)^{-1} \text{ g/kg}) \times (1 \times 10^6 \text{ J/MJ}) = 9390 \text{ J}$$

80. Turfa

Quantidade total = $6,29 \times 10^{-7} \text{ kg}$

Poder calorífico = 16 MJ/kg

$$\text{Total} = (6,29 \times 10^{-7} \text{ kg}) \times (16 \text{ MJ/kg}) \times (1 \times 10^6 \text{ J/MJ}) = 10,06 \text{ J}$$

C.7. Conversão de unidades na tabela para 1 kg de Etileno

1. Água (do processo - origem não especificada)

Quantidade total = $3,18 \times 10^{-3} \text{ m}^3$

Fator de conversão = 4,186 J/g

$$\text{Total} = (3,18 \times 10^{-3} \text{ m}^3) \times (1000 \text{ kg/m}^3) \times (1000 \text{ g/kg}) \times (4,186 \text{ J/g}) = 13307 \text{ J}$$

2. Água (para resfriamento- origem não especificada)

Quantidade total = $1,39 \times 10^{-2} \text{ m}^3$

Densidade da água = 1000 kg/m^3

$$\text{Total} = (1,39 \times 10^{-2} \text{ m}^3) \times (1000 \text{ kg/m}^3) \times (1000 \text{ g/kg}) = 13903 \text{ g}$$

3. Água (lago)

Quantidade total = $9,85 \times 10^{-7} \text{ m}^3$

Densidade da água = 1000 kg/m^3

$$\text{Total} = (9,85 \times 10^{-7} \text{ m}^3) \times (1000 \text{ kg/m}^3) \times (1000 \text{ g/kg}) = 9,85 \times 10^{-1} \text{ g}$$

4. Água (mar)

Quantidade total = $1,54 \times 10^{-3} \text{ m}^3$

Fator de conversão = 4,186 J/g

$$\text{Total} = (1,54 \times 10^{-3} \text{ m}^3) \times (1000 \text{ kg/m}^3) \times (1000 \text{ g/kg}) \times (4,186 \text{ J/g}) = 6451 \text{ J}$$

5. Água (poço natural)

$$\text{Quantidade total} = 1,60 \times 10^{-4} \text{ m}^3$$

$$\text{Fator de conversão} = 4,186 \text{ J/g}$$

$$\text{Total} = (1,60 \times 10^{-4} \text{ m}^3) \times (1000 \text{ kg/m}^3) \times (1000 \text{ g/kg}) \times (4,186 \text{ J/g}) = 668,18 \text{ J}$$

6. Água (rio)

$$\text{Quantidade total} = 2,86 \times 10^{-4} \text{ m}^3$$

$$\text{Densidade da água} = 1000 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Total} = (2,86 \times 10^{-4} \text{ m}^3) \times (1000 \text{ kg/m}^3) \times (1000 \text{ g/kg}) = 285,73 \text{ g}$$

12. Madeira

$$\text{Quantidade total} = 1,05 \times 10^{-6} \text{ m}^3$$

$$\text{Densidade da madeira} = 6 \times 10^{-1} \text{ g/cm}^3$$

$$\text{Poder calorífico} = 15,5 \text{ MJ/kg}$$

$$\text{Total} = (1,05 \times 10^{-6} \text{ m}^3) \times (6 \times 10^{-1} \text{ g/cm}^3) \times (1 \times 10^6 \text{ cm}^3/\text{m}^3) \times (15,5 \text{ MJ/kg}) \times ((1000)^{-1} \text{ g/kg}) \times (1 \times 10^6 \text{ J/MJ}) = 9765 \text{ J}$$

80. Turfa

$$\text{Quantidade total} = 2,19 \times 10^{-6} \text{ kg}$$

$$\text{Poder calorífico} = 16 \text{ MJ/kg}$$

$$\text{Total} = (2,19 \times 10^{-6} \text{ kg}) \times (16 \text{ MJ/kg}) \times (1 \times 10^6 \text{ J/MJ}) = 35,05 \text{ J}$$

C.8. Conversão de unidades na tabela para 1 kg de Oxido de etileno**1. Água (do processo - origem não especificada)**

$$\text{Quantidade total} = 3,00 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$\text{Fator de conversão} = 4,186 \text{ J/g}$$

$$\text{Total} = (3,00 \times 10^{-3} \text{ m}^3) \times (1000 \text{ kg/m}^3) \times (1000 \text{ g/kg}) \times (4,186 \text{ J/g}) = 12559 \text{ J}$$

2. Água (para resfriamento- origem não especificada)

$$\text{Quantidade total} = 3,35 \times 10^{-2} \text{ m}^3$$

$$\text{Densidade da água} = 1000 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Total} = (3,35 \times 10^{-2} \text{ m}^3) \times (1000 \text{ kg/m}^3) \times (1000 \text{ g/kg}) = 33533 \text{ g}$$

3. Água (lago)

$$\text{Quantidade total} = 7,84 \times 10^{-7} \text{ m}^3$$

$$\text{Densidade da água} = 1000 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Total} = (7,84 \times 10^{-7} \text{ m}^3) \times (1000 \text{ kg/m}^3) \times (1000 \text{ g/kg}) = 7,8 \times 10^{-1} \text{ g}$$

4. Água (mar)

$$\text{Quantidade total} = 1,23 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$\text{Fator de conversão} = 4,186 \text{ J/g}$$

$$\text{Total} = (1,23 \times 10^{-3} \text{ m}^3) \times (1000 \text{ kg/m}^3) \times (1000 \text{ g/kg}) \times (4,186 \text{ J/g}) = 5132 \text{ J}$$

5. Água (poço natural)

$$\text{Quantidade total} = 5,07 \times 10^{-4} \text{ m}^3$$

$$\text{Fator de conversão} = 4,186 \text{ J/g}$$

$$\text{Total} = (5,07 \times 10^{-4} \text{ m}^3) \times (1000 \text{ kg/m}^3) \times (1000 \text{ g/kg}) \times (4,186 \text{ J/g}) = 2122 \text{ J}$$

6. Água (rio)

$$\text{Quantidade total} = 2,27 \times 10^{-4} \text{ m}^3$$

$$\text{Densidade da água} = 1000 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Total} = (2,27 \times 10^{-4} \text{ m}^3) \times (1000 \text{ kg/m}^3) \times (1000 \text{ g/kg}) = 227,43 \text{ g}$$

12. Madeira

$$\text{Quantidade total} = 8,34 \times 10^{-7} \text{ m}^3$$

$$\text{Densidade da madeira} = 6 \times 10^{-1} \text{ g/cm}^3$$

$$\text{Poder calorífico} = 15,5 \text{ MJ/kg}$$

80. Turfa

$$\text{Quantidade total} = 1,74 \times 10^{-6} \text{ kg}$$

$$\text{Poder calorífico} = 16 \text{ MJ/kg}$$

$$\text{Total} = (1,74 \times 10^{-6} \text{ kg}) \times (16 \text{ MJ/kg}) \times (1 \times 10^6 \text{ J/MJ}) = 27,9 \text{ J}$$

$$\text{Total} = (8,34 \times 10^{-7} \text{ m}^3) \times (6 \times 10^{-1} \text{ g/cm}^3) \times (1 \times 10^6 \text{ cm}^3/\text{m}^3) \times (15,5 \text{ MJ/kg}) \times ((1000)^{-1} \text{ g/kg}) \times (1 \times 10^6 \text{ J/MJ}) = 7753 \text{ J}$$

C.9. Conversão de unidades na tabela para 1 kg de etilenoglicol**1. Água (do processo - origem não especificada)**

$$\text{Quantidade total} = 8,11 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$\text{Fator de conversão} = 4,186 \text{ J/g}$$

$$\text{Total} = (8,11 \times 10^{-3} \text{ m}^3) \times (1000 \text{ kg/m}^3) \times (1000 \text{ g/kg}) \times (4,186 \text{ J/g}) = 33964 \text{ J}$$

2. Água (para resfriamento- origem não especificada)

$$\text{Quantidade total} = 3,35 \times 10^{-2} \text{ m}^3$$

$$\text{Densidade da água} = 1000 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Total} = (3,35 \times 10^{-2} \text{ m}^3) \times (1000 \text{ kg/m}^3) \times (1000 \text{ g/kg}) = 33507 \text{ g}$$

3. Água (lago)

$$\text{Quantidade total} = 5,59 \times 10^{-7} \text{ m}^3$$

$$\text{Densidade da água} = 1000 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Total} = (5,59 \times 10^{-7} \text{ m}^3) \times (1000 \text{ kg/m}^3) \times (1000 \text{ g/kg}) = 5,59 \times 10^{-1} \text{ g}$$

4. Água (mar)

$$\text{Quantidade total} = 8,75 \times 10^{-4} \text{ m}^3$$

$$\text{Fator de conversão} = 4,186 \text{ J/g}$$

$$\text{Total} = (8,75 \times 10^{-4} \text{ m}^3) \times (1000 \text{ kg/m}^3) \times (1000 \text{ g/kg}) \times (4,186 \text{ J/g}) = 3664 \text{ J}$$

5. Água (poço natural)

$$\text{Quantidade total} = 5,30 \times 10^{-4} \text{ m}^3$$

$$\text{Fator de conversão} = 4,186 \text{ J/g}$$

$$\text{Total} = (5,30 \times 10^{-4} \text{ m}^3) \times (1000 \text{ kg/m}^3) \times (1000 \text{ g/kg}) \times (4,186 \text{ J/g}) = 2220 \text{ J}$$

6. Água (rio)

$$\text{Quantidade total} = 1,62 \times 10^{-4} \text{ m}^3$$

$$\text{Densidade da água} = 1000 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Total} = (1,62 \times 10^{-4} \text{ m}^3) \times (1000 \text{ kg/m}^3) \times (1000 \text{ g/kg}) = 162,28 \text{ g}$$

12. Madeira

$$\text{Quantidade total} = 5,95 \times 10^{-7} \text{ m}^3$$

$$\text{Densidade da madeira} = 6 \times 10^{-1} \text{ g/cm}^3$$

$$\text{Poder calorífico} = 15,5 \text{ MJ/kg}$$

$$\text{Total} = (5,95 \times 10^{-7} \text{ m}^3) \times (6 \times 10^{-1} \text{ g/cm}^3) \times (1 \times 10^6 \text{ cm}^3/\text{m}^3) \times (15,5 \text{ MJ/kg}) \times ((1000)^{-1} \text{ g/kg}) \times (1 \times 10^6 \text{ J/MJ}) = 5532 \text{ J}$$

80. Turfa

$$\text{Quantidade total} = 1,24 \times 10^{-6} \text{ kg}$$

$$\text{Poder calorífico} = 16 \text{ MJ/kg}$$

$$\text{Total} = (1,24 \times 10^{-6} \text{ kg}) \times (16 \text{ MJ/kg}) \times (1 \times 10^6 \text{ J/MJ}) = 19,91 \text{ J}$$

C.10. Conversão de unidades na tabela para 1 kg de ácido tereftalato purificado (PTA)**1. Água (do processo - origem não especificada)**

$$\text{Quantidade total} = 5,61 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$\text{Fator de conversão} = 4,186 \text{ J/g}$$

$$\text{Total} = (5,61 \times 10^{-3} \text{ m}^3) \times (1000 \text{ kg/m}^3) \times (1000 \text{ g/kg}) \times (4,186 \text{ J/g}) = 23471 \text{ J}$$

2. Água (para resfriamento- origem não especificada)

$$\text{Quantidade total} = 3,81 \times 10^{-2} \text{ m}^3$$

Densidade da água = 1000 kg/m³

$$\text{Total} = (3,81 \times 10^{-2} \text{ m}^3) \times (1000 \text{ kg/m}^3) \times (1000 \text{ g/kg}) = 38069 \text{ g}$$

3. Água (lago)

Quantidade total = 7,32 x 10⁻⁶ m³

Densidade da água = 1000 kg/m³

$$\text{Total} = (7,32 \times 10^{-6} \text{ m}^3) \times (1000 \text{ kg/m}^3) \times (1000 \text{ g/kg}) = 7,32 \text{ g}$$

4. Água (mar)

Quantidade total = 4,08 x 10⁻³ m³

Fator de conversão = 4,186 J/g

$$\text{Total} = (4,08 \times 10^{-3} \text{ m}^3) \times (1000 \text{ kg/m}^3) \times (1000 \text{ g/kg}) \times (4,186 \text{ J/g}) = 17070 \text{ J}$$

5. Água (poço natural)

Quantidade total = 2,86 x 10⁻⁴ m³

Fator de conversão = 4,186 J/g

$$\text{Total} = (2,86 \times 10^{-4} \text{ m}^3) \times (1000 \text{ kg/m}^3) \times (1000 \text{ g/kg}) \times (4,186 \text{ J/g}) = 1198 \text{ J}$$

6. Água (rio)

Quantidade total = 2,57 x 10⁻² m³

Densidade da água = 1000 kg/m³

$$\text{Total} = (2,57 \times 10^{-2} \text{ m}^3) \times (1000 \text{ kg/m}^3) \times (1000 \text{ g/kg}) = 25652 \text{ g}$$

12. Madeira

Quantidade total = 1,76 x 10⁻⁶ m³

Densidade da madeira = 6 x 10⁻¹ g/cm³

Poder calorífico = 15,5 MJ/kg

$$\text{Total} = (1,76 \times 10^{-6} \text{ m}^3) \times (6 \times 10^{-1} \text{ g/cm}^3) \times (1 \times 10^6 \text{ cm}^3/\text{m}^3) \times (15,5 \text{ MJ/kg}) \times ((1000)^{-1} \text{ g/kg}) \times (1 \times 10^6 \text{ J/MJ}) = 16409 \text{ J}$$

80. Turfa

Quantidade total = 5,89 x 10⁻⁶ kg

Poder calorífico = 16 MJ/kg

$$\text{Total} = (5,89 \times 10^{-6} \text{ kg}) \times (16 \text{ MJ/kg}) \times (1 \times 10^6 \text{ J/MJ}) = 94,19 \text{ J}$$

C.11. Conversão de unidades na tabela para 1 kg de PET

1. Água (do processo - origem não especificada)

Quantidade total = 4,23 x 10⁻³ m³

Fator de conversão = 4,186 J/g

$$\text{Total} = (4,23 \times 10^{-3} \text{ m}^3) \times (1000 \text{ kg/m}^3) \times (1000 \text{ g/kg}) \times (4,186 \text{ J/g}) = 17691 \text{ J}$$

2. Água (para resfriamento- origem não especificada)

$$\text{Quantidade total} = 5,12 \times 10^{-2} \text{ m}^3$$

$$\text{Densidade da água} = 1000 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Total} = (5,12 \times 10^{-2} \text{ m}^3) \times (1000 \text{ kg/m}^3) \times (1000 \text{ g/kg}) = 51226 \text{ g}$$

3. Água (lago)

$$\text{Quantidade total} = 1,52 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$\text{Densidade da água} = 1000 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Total} = (1,52 \times 10^{-3} \text{ m}^3) \times (1000 \text{ kg/m}^3) \times (1000 \text{ g/kg}) = 1516 \text{ g}$$

4. Água (mar)

$$\text{Quantidade total} = 6,62 \times 10^{-5} \text{ m}^3$$

$$\text{Fator de conversão} = 4,186 \text{ J/g}$$

$$\text{Total} = (6,62 \times 10^{-5} \text{ m}^3) \times (1000 \text{ kg/m}^3) \times (1000 \text{ g/kg}) \times (4,186 \text{ J/g}) = 277,09 \text{ J}$$

5. Água (poço natural)

$$\text{Quantidade total} = 6,34 \times 10^{-4} \text{ m}^3$$

$$\text{Fator de conversão} = 4,186 \text{ J/g}$$

$$\text{Total} = (6,34 \times 10^{-4} \text{ m}^3) \times (1000 \text{ kg/m}^3) \times (1000 \text{ g/kg}) \times (4,186 \text{ J/g}) = 2656 \text{ J}$$

6. Água (rio)

$$\text{Quantidade total} = 1,77 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$\text{Densidade da água} = 1000 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Total} = (1,77 \times 10^{-3} \text{ m}^3) \times (1000 \text{ kg/m}^3) \times (1000 \text{ g/kg}) = 1769 \text{ g}$$

12. Madeira

$$\text{Quantidade total} = 1,04 \times 10^{-6} \text{ m}^3$$

$$\text{Densidade da madeira} = 6 \times 10^{-1} \text{ g/cm}^3$$

$$\text{Poder calorífico} = 15,5 \text{ MJ/kg}$$

$$\text{Total} = (1,04 \times 10^{-6} \text{ m}^3) \times (6 \times 10^{-1} \text{ g/cm}^3) \times (1 \times 10^6 \text{ cm}^3/\text{m}^3) \times (15,5 \text{ MJ/kg}) \times ((1000)^{-1} \text{ g/kg}) \times (1 \times 10^6 \text{ J/MJ}) = 9643 \text{ J}$$

80. Turfa

$$\text{Quantidade total} = 9,39 \times 10^{-7} \text{ kg}$$

$$\text{Poder calorífico} = 16 \text{ MJ/kg}$$

$$\text{Total} = (9,39 \times 10^{-7} \text{ kg}) \times (16 \text{ MJ/kg}) \times (1 \times 10^6 \text{ J/MJ}) = 15,02 \text{ J}$$

9. Outras energias renováveis

Média ponderada da UEV para outras energias renováveis:

		Processos anteriores				
		Para xileno	Óxido de etileno	Etileno glicol	PTA	Média
Insumo de energia (MJ)	Cinética*	$2,18 \times 10^{-2}$	$1,61 \times 10^{-1}$	$1,73 \times 10^{-1}$	$1,32 \times 10^{-1}$	$1,22 \times 10^{-1}$
	Solar	$1,71 \times 10^{-3}$	$1,69 \times 10^{-2}$	$1,82 \times 10^{-2}$	$3,60 \times 10^{-2}$	$1,82 \times 10^{-2}$
	Geotérmica	$4,10 \times 10^{-4}$	$3,49 \times 10^{-3}$	$3,77 \times 10^{-3}$	$1,13 \times 10^{-3}$	$2,20 \times 10^{-3}$
	Total					$1,43 \times 10^{-1}$

*Energia cinética do vento

		Peso ponderado	UEV	UEV ponderada
Insumo de energia	Cinética*	85,7%	$9,90 \times 10^{-4}$	$8,48 \times 10^{-4}$
	Solar	12,8%	$7,93 \times 10^{-4}$	$1,01 \times 10^{-4}$
	Geotérmica	1,5%	$4,52 \times 10^{-5}$	$6,97 \times 10^{-3}$
	Total			$1,02 \times 10^{-5}$

*Energia cinética do vento

Anexo D – MEMORIAL DE CÁLCULO DA MÃO DE OBRA POR INDÚSTRIA (ANO 2008)

D.1. UEV da mão de obra europeia (trinta (30) países com o maior volume de produção de refinarias e petroquímica)

Energia total da Europa: $6,14 \times 10^{25}$ sej/ano
 População economicamente ativa: $2,98 \times 10^8$ pessoas
 Consumo calórico: $3,4 \times 10^3$ kcal/dia.pessoa
 Fator de conversão energia = 4186 J/kcal

$$\text{UEV} = [(6,14 \times 10^{25} \text{ sej/ano}) / (2,98 \times 10^8 \text{ pessoas}) \times (3,4 \times 10^3 \text{ kcal/dia.pessoa}) \times (4186 \text{ J/kcal}) \times (365 \text{ dias/ano})] = 3,96 \times 10^7 \text{ sej/J}$$

D.2. Energia metabólica da mão de obra

1. Petróleo

Número de empregados = $7,3 \times 10^4$ pessoas
 Produção = $9,9 \times 10^{10}$ kg/ano
 Fator de conversão energia = 4186 J/kcal
 Consumo calórico: $3,4 \times 10^3$ kcal/dia.pessoa
 Jornada laboral: 2250 hrs/ano (94 dias/ano)

$$\text{Total energia metabólica} = [(7,3 \times 10^4 \text{ pessoas}) \times (3,4 \times 10^3 \text{ kcal/dia.pessoa}) \times (4186 \text{ J/kcal}) \times (94 \text{ dias/ano})] / (9,9 \times 10^{10} \text{ kg/ano}) = 9,89 \times 10^2 \text{ J/kg}$$

2. Gás Natural

Número de empregados = $7,3 \times 10^4$ pessoas
 Produção = $1,72 \times 10^{11}$ kg/ano
 Fator de conversão energia = 4186 J/kcal
 Consumo calórico: $3,4 \times 10^3$ kcal/dia.pessoa
 Jornada laboral: 2250 hrs/ano (94 dias/ano)

$$\text{Total energia metabólica} = [(7,3 \times 10^4 \text{ pessoas}) \times (3,4 \times 10^3 \text{ kcal/dia.pessoa}) \times (4186 \text{ J/kcal}) \times (365 \text{ dias/ano})] / (1,72 \times 10^{11} \text{ kg/ano}) = 5,67 \times 10^2 \text{ J/kg}$$

3. Refinados do petróleo

Número de empregados = $12,83 \times 10^4$ pessoas

Produção = $6,22 \times 10^{11}$ kg/ano

Fator de conversão energia = 4186 J/kcal

Consumo calórico: $3,4 \times 10^3$ kcal/dia.pessoa

Jornada laboral: 2250 hrs/ano (94 dias/ano)

Total energia metabólica = $[(12,83 \times 10^4 \text{ pessoas}) \times (3,4 \times 10^3 \text{ kcal/dia.pessoa}) \times (4186 \text{ J/kcal}) \times (365 \text{ dias/ano})] / (6,22 \times 10^{11} \text{ kg/ano}) = 2,76 \times 10^2 \text{ J/kg}$

4. Produtos petroquímicos

Número de empregados = $30,89 \times 10^4$ pessoas

Produção = $1,02 \times 10^{11}$ kg/ano

Fator de conversão energia = 4186 J/kcal

Consumo calórico: $3,4 \times 10^3$ kcal/dia.pessoa

Jornada laboral: 2250 hrs/ano (94 dias/ano)

Total energia metabólica = $[(30,89 \times 10^4 \text{ pessoas}) \times (3,4 \times 10^3 \text{ kcal/dia.pessoa}) \times (4186 \text{ J/kcal}) \times (365 \text{ dias/ano})] / (1,02 \times 10^{11} \text{ kg/ano}) = 4,07 \times 10^3 \text{ J/kg}$

**Anexo E- CÁLCULO DA RAZÃO ENERGIA-DINHEIRO (EMR) PARA EUROPA
(ANO 2008)**

Pais	Energia usada	PIB (Dólares correntes)	EMR por país	EMR EUROPA
Alemanha	9,57E+24	3,75E+12	2,55E+12	
Austria	1,56E+24	4,28E+11	3,65E+12	
Bélgica	3,22E+24	5,19E+11	6,22E+12	
Bielorussia	5,82E+23	6,08E+10	9,59E+12	
Bulgaria	4,89E+23	5,47E+10	8,94E+12	
Croacia	2,70E+23	7,05E+10	3,84E+12	
Dinamarca	7,90E+23	3,53E+11	2,24E+12	
Eslovaquia	7,07E+23	1,00E+11	7,07E+12	
Espanha	6,76E+24	1,63E+12	4,13E+12	
Estonia	2,18E+23	2,42E+10	9,03E+12	
Finlândia	7,90E+23	2,84E+11	2,79E+12	
França	5,72E+24	2,92E+12	1,96E+12	
Grecia	5,10E+23	3,54E+11	1,44E+12	
Holanda	4,37E+24	9,36E+11	4,67E+12	
Hungria	8,84E+23	1,57E+11	5,63E+12	
Islândia	1,14E+23	1,75E+10	6,53E+12	
Italia	5,30E+24	2,39E+12	2,22E+12	
Letônia	1,66E+23	3,55E+10	4,68E+12	
Lituania	3,02E+23	4,79E+10	6,30E+12	
Moldavia	6,34E+22	6,05E+09	1,05E+13	
Noruega	1,14E+24	4,62E+11	2,48E+12	
Polônia	2,60E+24	5,30E+11	4,90E+12	
Portugal	1,25E+24	2,62E+11	4,76E+12	
Reino Unido	6,55E+24	2,79E+12	2,35E+12	
Republica checa	1,35E+24	2,35E+11	5,75E+12	
Rumania	8,84E+23	2,08E+11	4,25E+12	
Suecia	1,35E+24	5,14E+11	2,63E+12	
Suica	1,01E+24	5,52E+11	1,83E+12	
Turquia	2,70E+24	7,30E+11	3,70E+12	
Ucrania	1,87E+23	1,80E+11	1,04E+12	
TOTAIS	6,14E+25	2,06E+13		2,98E+12

Anexo F - PREÇOS USADOS NESTE TRABALHO (NOMINAIS-ANO 2008)

Insumo	Preços (U\$/unidade)		Fonte
Água- abastecimento publico	4,745	\$/m ³	http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2015/536369/EPRS_STU%282015%29536369_EN.pdf
Água- Rio	0,86	\$/m ³	Aylward et al (2010). The Economic Value of Water for Agricultural, Domestic and Industrial Uses: A Global Compilation of Economic Studies and Market Prices
Água-Mar	0,86	\$/m ³	Aylward et al (2010). The Economic Value of Water for Agricultural, Domestic and Industrial Uses: A Global Compilation of Economic Studies and Market Prices
Água-o.n.e	0,86	\$/m ³	Aylward et al (2010). The Economic Value of Water for Agricultural, Domestic and Industrial Uses: A Global Compilation of Economic Studies and Market Prices
Água-Poço natural	0,86	\$/m ³	Aylward et al (2010). The Economic Value of Water for Agricultural, Domestic and Industrial Uses: A Global Compilation of Economic Studies and Market Prices
Alumínio	2572	\$/ton	http://databank.worldbank.org/data/reports.aspx?source=global-economic-monitor-(gem)-commodities#
Anidrita	17	\$/ton	Mineral Commodity Summaries, 2009 (USGS)
Ar			Sem valor commercial
Areia	30,8	\$/ton	USGS
Argila	25,2	\$/ton	USGS
Barita	76,3	\$/ton	USGS
Basalto	100	\$/ton	https://www.alibaba.com/product-detail/natural-lava-basalt-stone_1722987886.html?s=p
Bauxita	30,1	\$/ton	USGS
Bentonita	22,6	\$/ton	USGS
Biomassa	172,28	\$/ton	http://www.andriusjanukonis.lt/wp-content/uploads/2014/04/140401_biokuro-rinka_Argus.pdf
Bórax	600	\$/ton	Mineral Commodity Summaries, 2009 (USGS) (BORON)
Brometo de Sódio	139	\$/ton	USGS (Média entre cloruro e sulfato de sódio)
Cádmio	5920	\$/ton	USGS
Calcário	92,4	\$/ton	USGS
Calcita	300	\$/ton	http://www.indmin.com/CalciumCarbonate.html
Carvão	122,39	\$/ton	http://databank.worldbank.org/data/reports.aspx?source=global-economic-monitor-(gem)-commodities#
Carbono			Sem valor commercial
Cascalho	30,8	\$/ton	USGS
Caulinita	85,6	\$/ton	USGS
Cério	4350	\$/ton	https://www.fas.org/sgp/crs/natsec/R41347.pdf

Chumbo	2090,66	\$/ton	http://databank.worldbank.org/data/reports.aspx?source=global-economic-monitor-(gem)-commodities#
Cinábrio	17400	\$/ton	USGS
Cloreto de potasio	570	\$/ton	http://databank.worldbank.org/data/reports.aspx?source=global-economic-monitor-(gem)-commodities#
Cloreto de potásio	570,12	\$/ton	http://databank.worldbank.org/data/reports.aspx?source=global-economic-monitor-(gem)-commodities#
Cloreto de sódio	35,8	\$/ton	USGS
Cobalto	68400	\$/ton	USGS
Cobre	6955,88	\$/ton	http://databank.worldbank.org/data/reports.aspx?source=global-economic-monitor-(gem)-commodities#
Colemanita	296	\$/ton	USGS
Crisotila	747	\$/ton	USGS
Cromo	3490	\$/ton	USGS
Diatomita	224	\$/ton	USGS
Dióxido de carbono	36	\$/ton	http://www.eesi.org/papers/view/fact-sheet-carbon-pricing-around-the-world?/fact-sheet-carbon-pricing-around-world-17-oct-2012
Dióxido de titânio	2210	\$/ton	USGS
Dolomita	180	\$/ton	USGS
Electricidade	0,13	\$/kWh	Eurostat
Enxofre	264	\$/ton	USGS
Estanho	18510	\$/ton	http://databank.worldbank.org/data/reports.aspx?source=global-economic-monitor-(gem)-commodities#
Estibinita	6170	\$/ton	USGS
Etileno	1106	\$/ton	http://www.icis.com
Etilenoglicol	1195	\$/ton	http://www.icis.com
Európio	475000	\$/ton	https://www.fas.org/sgp/crs/natsec/R41347.pdf
Feldspato	76,5	\$/ton	USGS
Ferro	155,99	\$/ton	http://databank.worldbank.org/data/reports.aspx?source=global-economic-monitor-(gem)-commodities#
Ferro-manganês	2380	\$/ton	USGS
Flúor	307	\$/ton	http://resourceclips.com/wp-content/feature_images/Intro-to-Fluorspar.pdf
Fluorita	250	\$/ton	http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/fluorspar/myb1-2008-fluor.pdf
Fosfato	345,59	\$/ton	USGS
Fósforo	345,59	\$/ton	USGS
Gás Natural	617	\$/ton	http://databank.worldbank.org/data/reports.aspx?source=global-economic-monitor-(gem)-commodities#
Gadolínio	150000	\$/ton	http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/rare_earth/myb1-2008-raree.pdf

Gesso	19,5	\$/ton	USGS
Giz (CaCO ₃)	75	\$/ton	https://roskill.com/wp/wp-content/uploads/2014/11/download-roskills-paper-on-the-north-american-calcium-carbonate-market.attachment1.pdf
Granito	2380	\$/ton	http://www.ucl.ac.uk/earth-sciences/impact/geology/london/citycemetery/weathering/granite
Hidrogênio			Sem valor comercial
Índio	519000	\$/ton	USGS
Kieserita	200	\$/ton	Estimado baseado em http://www.magnesium-fertilizer.com/products/china-kieserite-fertilizer-price-manufacturer-174685.html
Lantânio	7750	\$/ton	https://www.fas.org/sgp/crs/natsec/R41347.pdf
Lignita	17,52	\$/ton	http://www.ey.com/Publication/vwLUAssets/EY_European_Lignite_Mines_Benchmarking_2014/\$FILE/EY-European-Lignite-Mines-Benchmarking-2014.pdf
Lítio	4440	\$/ton	USGS
Madeira	16,06	\$/GJ	Wood fuel price statistics in Europe – EUBionet
Magnésio	4000	\$/ton	http://www.asianmetal.cn/report/en/2008mei_en.pdf
Magnesita	270	\$/ton	http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/magnesium/myb1-2008-mgcom.pdf (Valor de importaciones de magnesita crudo)
Manganês	2380	\$/ton	USGS
Mercurio	17400	\$/ton	USGS
Molibdênio	63000	\$/ton	USGS
Nafta	793	\$/ton	https://www.bdm.insee.fr/bdm2/affichageSeries?idbank=001641576&page=tableau&request_locale=en
Neodímio	27000	\$/ton	https://www.fas.org/sgp/crs/natsec/R41347.pdf
Niquel	21110,64	\$/ton	http://databank.worldbank.org/data/reports.aspx?source=global-economic-monitor-(gem)-commodities#
Nitrato de sódio	682	\$/ton	https://www.usitc.gov/publications/701_731/pub4451.pdf
Nitrogênio			Sem valor comercial
Olivina	33,58	\$/ton	http://www.innovationconcepts.eu/res/literatuurSchuiling/olivinehills.pdf
Ouro	28025	\$/kg	http://databank.worldbank.org/data/reports.aspx?source=global-economic-monitor-(gem)-commodities#
Oxigênio			Sem valor comercial
Oxido de etileno	1612	\$/ton	http://www.orbichem.com/userfiles/CNF%20Samples/eox_13_11.pdf
p-xileno	1132	\$/ton	http://www.icis.com
Petróleo	715	\$/ton	http://databank.worldbank.org/data/reports.aspx?source=global-economic-monitor-(gem)-commodities#
Paládio	11252	\$/kg	http://www.kitco.com/scripts/hist_charts/monthly_graphs.plx
Platina	49045	\$/kg	http://databank.worldbank.org/data/reports.aspx?source=global-economic-monitor-(gem)-commodities#

Polietileno	1680	\$/ton	http://www.orbichem.com/userfiles/CNF%20Samples/pet_13_11.pdf
Tereftalato			
Praseodímio	32000	\$/ton	https://www.fas.org/sgp/crs/natsec/R41347.pdf
Prata	482	\$/kg	http://databank.worldbank.org/data/reports.aspx?source=global-economic-monitor-(gem)-commodities#
PTA	1166,2	\$/ton	http://www.orbichem.com/userfiles/CNF_Samples/dmp_13_11.pdf
Pygas	834	\$/ton	Preço médio estimado entre o preço do bençeno (875 U\$/ton) e da nafta
Rênio	10400	\$/kg	USGS
rocha metamórfica, grafita	826	\$/ton	USGS
Ródio	207592	\$/kg	http://www.kitco.com/scripts/hist_charts/yearly_graphs.plx
Rutile	2210	\$/ton	USGS
Rutilo	515	\$/ton	https://www.iluka.com/docs/mineral-sands-briefing-papers/overview-of-market-conditions-2009-march-2010
Samário	4800	\$/ton	https://www.fas.org/sgp/crs/natsec/R41347.pdf
Silvita (KCL)	570,1	\$/ton	http://databank.worldbank.org/data/reports.aspx?source=global-economic-monitor-(gem)-commodities#
Sulfato de cálcio (CaSO ₄)	19,5	\$/ton	USGS
Sulfato de sódio	148	\$/ton	USGS
Talco	152	\$/ton	USGS
Tântalo	118000	\$/ton	https://www.metalary.com/tantalum-price/
Telúrio	210000	\$/ton	USGS
Turfa	26,4	\$/ton	USGS
Ulexita	301	\$/ton	USGS
Urânio	134,2	\$/kg	https://www.oecd-neo.org/ndd/pubs/2012/7059-uranium-2011.pdf
Xileno	851	\$/ton	http://www.orbichem.com/userfiles/test/cmb_fm_14_06.pdf
Xisto	11,5	\$/ton	USGS
Zinco	1874,71	\$/kg	http://databank.worldbank.org/data/reports.aspx?source=global-economic-monitor-(gem)-commodities#
Zircônio	788	\$/ton	USGS